

Universidad Carlos III de Madrid
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Ingeniería Eléctrica



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Técnica Industrial, especialidad Electrónica
Industrial

Monitorización continua de Descargas Parciales para
caracterización de sistemas de aislamiento en máquinas
eléctricas

Autor: Álvaro Sancho Blázquez
Director: Juan Manuel Martínez Tarifa

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. INTRODUCCIÓN A LA DETECCIÓN DE DPs EN MÁQUINAS ROTATIVAS.....	3
2.1. Introducción a las descargas parciales.....	3
2.1.1. Definición.....	3
2.1.2. Tipos de Descargas Parciales.....	6
2.1.3. Consecuencias de las Descargas Parciales.....	9
2.2. Aislamiento estatórico y descargas parciales.....	10
2.2.1. Materiales aislantes.....	10
2.2.2. Sistemas de aislamiento del devanado estatórico.....	13
2.2.3. Tipos de sistemas de aislamiento del devanado estatórico.....	14
2.3. Principales procesos de envejecimiento.....	16
2.3.1. Mecanismos de ruptura y reparación de devanados estatóricos.....	18
2.4. Ensayos de Mantenimiento y Aceptación.....	27
2.5. Test de Envejecimiento.....	40
2.6. Parámetros estadísticos que informan el grado de deterioro.....	45
3. DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE DE MONITORIZACIÓN DE Techimp Systems S.r.l.....	48
3.1. Software <i>PDMonitor</i>	49
3.1.1. Aplicación <i>Monitoring setup</i>	50
3.1.2. Aplicación <i>Client PCE</i>	61
3.1.3. Aplicación <i>Resume Viewer</i>	63
3.2. Software <i>PDCheck Control</i>	70
4. RESULTADOS.....	78
4.1. Montaje experimental.....	78
4.2. Resultados de <i>Qmax 95%</i>	81
4.2.1. <i>Qmax 95% de hilo Acebsa</i>	81
4.2.2. <i>Qmax 95% de hilo REA</i>	85
4.2.3. <i>Qmax 95% de hilo Partzsch</i>	94
4.3. Resultados de <i>Alfa</i>	99
4.3.1. <i>Alfa de hilo Acebsa</i>	99
4.3.2. <i>Alfa de hilo REA</i>	103
4.3.3. <i>Alfa de hilo Partzsch</i>	112
4.4. Resultados de <i>NQN</i>	116
4.4.1. <i>NQN de hilo Acebsa</i>	116
4.4.2. <i>NQN de hilo REA</i>	120
4.4.3. <i>NQN de hilo Partzsch</i>	129
4.5. Resumen de resultados obtenidos.....	134
5. CONCLUSIONES.....	137
6. BIBLIOGRAFÍA.....	139
6.1. Normativa relacionada.....	140

1.- Introducción.

Uno de los grandes problemas de la Industria actual es la gestión de los activos de la red eléctrica que permiten garantizar el suministro a particulares y empresas. Dentro de estos elementos a vigilar, los puntos de generación de energía eléctrica y algunos puntos de consumo críticos resultan vitales. Esta es la razón de que se dedique un gran esfuerzo de mantenimiento en maquinaria rotativa de Alta Tensión (AT) e incluso en ciertos motores de industrias esenciales.

En casi toda la aparamenta eléctrica y más concretamente en máquinas rotativas, es bien conocido que el fenómeno de las Descargas Parciales (DP, “Partial Discharge”) es responsable de fallos anticipados de sus sistemas de aislamiento, y responsable de paradas no programadas. Estas descargas eléctricas que cortocircuitan sólo parcialmente el material aislante que se encuentra entre dos conductores a diferente potencial. La existencia de este fenómeno es una gran desventaja, pues está muy documentado que las descargas parciales son un fenómeno que degrada progresivamente el material aislante de este tipo de máquinas generando averías, y con el tiempo causar su destrucción total. Más aún, estas pequeñas ionizaciones se producen con niveles de tensión nominal sobre las máquinas en cuestión. Por otro lado, si somos capaces de detectarlas y medirlas correctamente, obtenemos información importante de la degradación que sufre la máquina, pues su actividad crece a la vez que aumenta el envejecimiento del material aislante. Mediante su detección y análisis podemos planificar tareas de mantenimiento y detectar posibles averías.

Por otro lado, los fabricantes de maquinaria eléctrica realizan ensayos normalizados de aceptación destinados a certificar la calidad de los sistemas de aislamiento de máquinas eléctricas en su salida de fábrica. Aún así, están documentados fallos anticipados en los sistemas de aislamiento debido a la actividad de DP, por lo que ciertos fabricantes de materiales aislantes y componentes desarrollan ensayos de resistencia al ataque por descargas parciales, en los que se provoca una elevada actividad de DP para analizar nuevos materiales aislantes u objetos y así sacar conclusiones acerca de su comportamiento (Off-line).

El objetivo del proyecto no es demostrar si el fenómeno de DP realmente actúa como indicador de fallos anticipados, pues eso ya está más que contrastado. De lo que trata este documento es mostrar las ventajas de la monitorización de DP. Para ello se han analizado los patrones de DP obtenidos en ensayos de envejecimiento acelerado, aplicado sobre tres tipos de hilo de cobre de distintos fabricantes. Se muestra que los esmaltes de los hilos de cobre aumentan su magnitud estadística de DP antes del fallo de los mismos. Todo esto mediante la utilización de novedosos sistemas de monitorización y adquisición de datos automáticos *PDBase* y *PDCheck*, adquiridos por el Laboratorio de Investigación y Ensayos de Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid.

Durante el proyecto se realiza una breve introducción a las DP, los materiales aislantes empleados en máquinas rotativas, principales mecanismos y test de envejecimiento junto con algunos de los ensayos de mantenimiento que se realizan. Continúa con la guía que describe la utilidad y el correcto manejo del software *PDMonitor* y *PDCheck Control*, empleado durante los ensayos realizados. Para

terminar presentaremos los resultados obtenidos en los ensayos de envejecimiento de DP, además del análisis de los parámetros más importantes a la hora de intentar conocer la degradación sufrida.

2.- Introducción a la detección de DP en máquinas rotativas.

2.1.- Introducción a las descargas parciales.

2.1.1.- Definición.

Las descargas parciales “DP” son descargas eléctricas que cortocircuitan sólo parcialmente el material aislante que se encuentra entre dos conductores a diferente potencial.

Pueden originarse en el interior de aislantes sólidos, líquidos y gaseosos. Estas descargas son responsables directas de la degradación progresiva que se produce en los materiales dieléctricos utilizados en los sistemas de aislamiento de los equipos y componentes de alta tensión. La degradación originada depende de la naturaleza del aislamiento, de manera que los materiales de naturaleza orgánica o compuesta son muy sensibles al fenómeno, mientras que los inorgánicos se degradan menos.

La causa habitual de las descargas son defectos en el aislamiento (figura 2.1):

- Burbujas, huecos, grietas en interior del aislamiento.
- Impurezas y elementos extraños.
- Errores de diseño en el sistema de aislamiento.
- Degradación de la homogeneidad en el aislamiento (interfaces cobre-aislamiento o aislamiento-chapa).

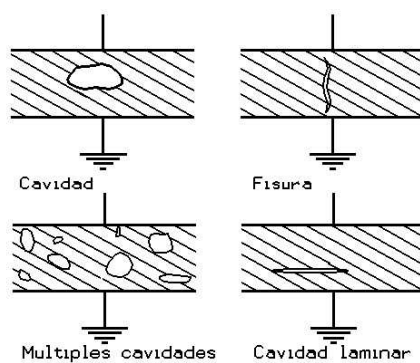


Figura 2.1. Distintos defectos del aislamiento.

El hecho de que un sistema pueda llegar a la ruptura eléctrica dependerá de que las vacuolas que incluya sufran descargas parciales bajo las tensiones de operación del sistema, de la intensidad de las mismas, geometría, localización, clase de las DP existentes y de la capacidad de degradación que pueda presentar el material aislante. La presencia de una sola vacuola es suficiente para que se produzca la posible ruptura final del aislamiento, al perforarse en aquel punto en que se supere el valor crítico de la rigidez dieléctrica.

Las descargas parciales son únicamente aquellas que se auto extinguen; en caso contrario, significarían la ruptura del aislante en un corto espacio de tiempo. La causa de que esto ocurra es el campo eléctrico, que no es suficiente en ese punto para mantener las DP o la reorganización de carga espacial en las paredes del sólido, que hace que el campo disminuya y no se produzcan. Es imprescindible que exista una fase gaseosa para que se produzcan.

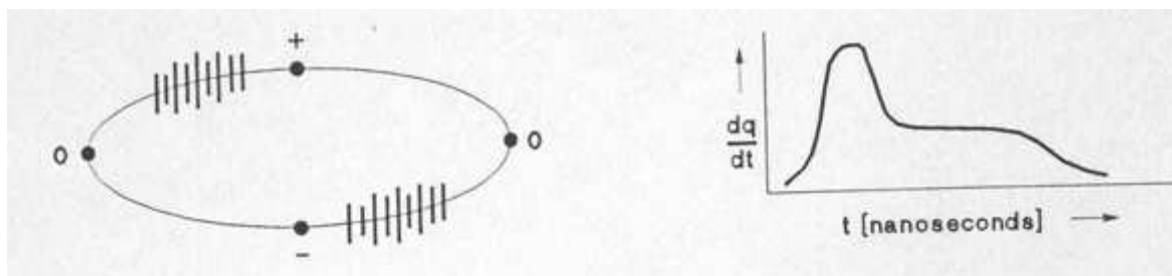


Figura 2.2. Representación de pulsos de descargas parciales.

Las descargas parciales producen desplazamientos de corriente de corta duración (0.1-10ns) en el aislante. Estos pulsos de corriente son capturados mediante los circuitos de detección adecuados ([J. Díaz-Gautier, 2002], ver también sección 2.4 y generalmente se miden y representan superpuestos a la tensión de red en los llamados patrones resueltos en fase de DP (“Phase resolved Partial discharge patterns” ó PRPD patterns). Como se verá más adelante, estos patrones permiten interpretar el fenómeno e identificar la fuente de DPs.

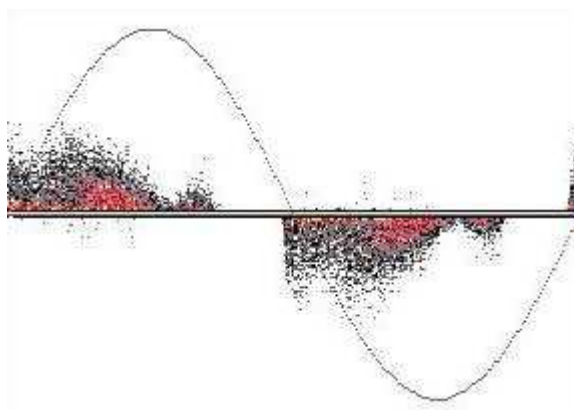


Figura 2.3. Representación de descargas parciales sobre la onda sinusoidal de tensión.

La magnitud de las descargas tiene una relación directa con el tamaño del defecto de mayores dimensiones, lo que muchas veces determina la gravedad del daño. Se usan las siguientes unidades para su medida:

- MiliVoltios (mV). Aplicable a objetos inductivos (medida directa).
- PicoCulombios (pC). Aplicable para objetos capacitivos. Requiere calibración para cada objeto de medida. Representa la carga aparente de DP. Usual en laboratorios de ensayo/fábricas.

- MiliAmperios (mA). Cuando se utilizan transformadores de corriente para realizar la medida.
- Decibelios (dBm). Cuando se utilizan analizadores de espectros.

Una unidad de medida que también sirve para caracterizar la actividad de descargas parciales es los pulsos por segundo “pps”. Tiene una relación directa con la cantidad de huecos, o lo que es lo mismo, con la extensión del daño. A mayor cantidad de huecos o defectos, mayor número de descargas y viceversa. Igualmente, este parámetro sirve para dar fiabilidad estadística a las medidas de magnitud, pues no siempre un pulso detectado de gran magnitud será relevante si no se repite lo suficiente.

Otros parámetros importantes son la polaridad y el ángulo de fase respecto a la frecuencia de red (figura 2.4). Esto está relacionado directamente con la ubicación de las vacuolas o espacios de aire, y a su vez con el tipo de daño que se está produciendo y el tipo de descarga. Cada tipo de descarga tiene un patrón de descargas determinado y, dentro de una máquina rotativa, se producirá en un lugar concreto como explicaremos más adelante.

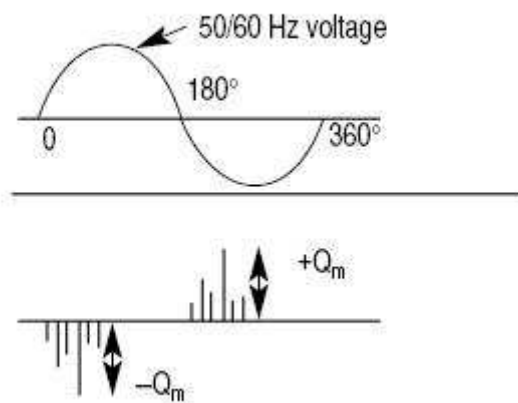


Figura 2.4. Detalle de la polaridad de los pulsos y su relación con la fase.

2.1.2.- Tipos de Descargas Parciales.

Las DP afectan al sistema de aislamiento de diferentes maneras, dependiendo de las características de cada uno. De hecho algunos aislantes, en particular los basados en Mica, están diseñados para soportar un nivel moderado de DP producidas en vacuolas, mientras que otros, basados en polímeros orgánicos, son degradados muy rápidamente por la actividad de DP debido a que se generan arborescencias (*Treeing*) que aceleran el proceso de ruptura final (Figura 2.5).

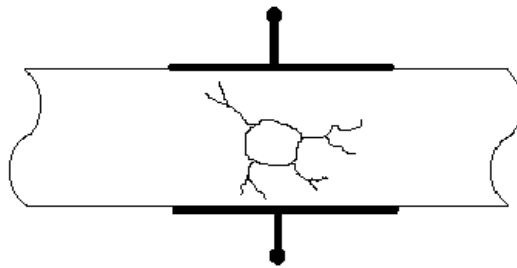


Figura 2.5. Fenómeno de arborescencia en un aislante.

Las descargas parciales se pueden caracterizar en tres tipos dependiendo de las propiedades del medio existente entre los electrodos:

- Descargas parciales internas: Este tipo de descargas se producen en burbujas de gas que se encuentran en el interior de un material aislante sólido, o entre el aislante y un electrodo. Si este fenómeno se produce continuamente puede llegar a erosionar el material de tal forma que consiga destruirlo completamente. En máquinas rotativas, estas descargas son muy comunes en aislamientos conductor-conductor y conductor-ranura.

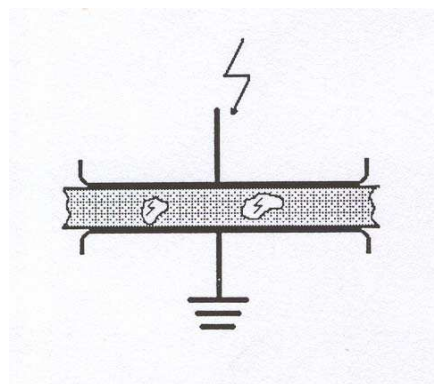


Figura 2.6. Fenómeno de descarga parcial interna.

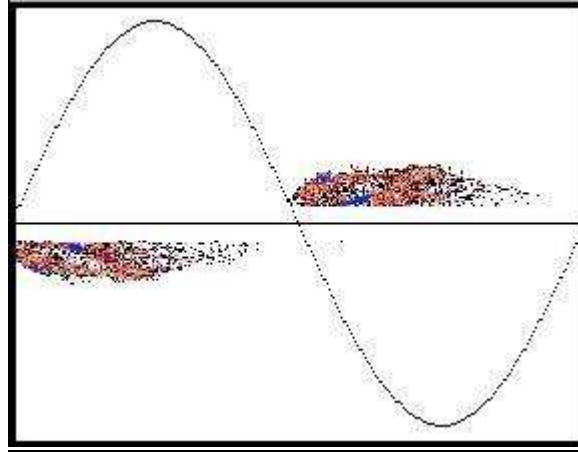


Figura 2.7. Ejemplo de patrón de descargas parciales internas en ensayo sobre polietileno reticulado sumergido en aceite.

- Descargas parciales superficiales: Las descargas se producen en huecos gaseosos que dejan superficies abiertas frente a materiales aislantes sólidos. En máquinas rotativas estas descargas se producen en las ranuras del devanado entre el núcleo y el aislamiento de tierra o bien entre los conductores y el aislamiento.

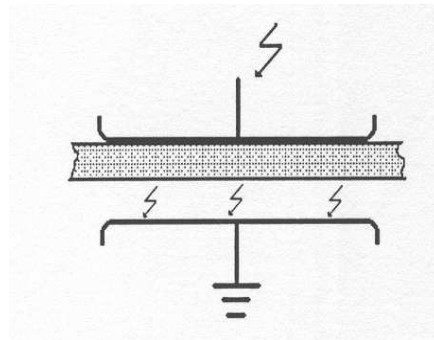


Figura 2.8. Fenómeno de descarga parcial superficial.

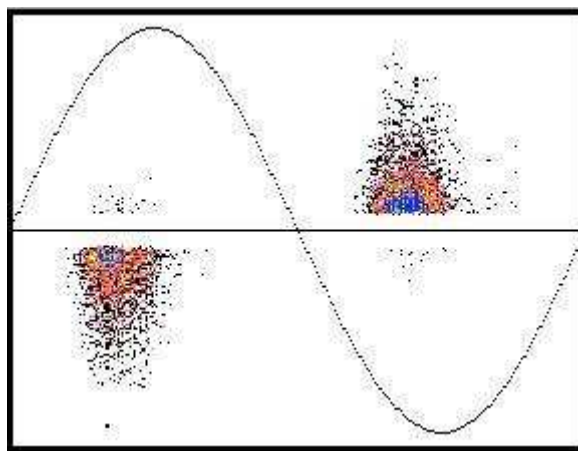


Figura 2.9. Patrón característico de descargas parciales superficiales en ensayo sobre polietileno reticulado sumergido en aceite.

- Descargas parciales por efecto corona: Se producen en geometrías punta-gas-plano, de manera que la alta divergencia de campo eléctrico resultante provoca una ruptura del aislamiento que proporciona el gas (generalmente, aire). Este tipo de descarga suele generar ruido e incluso luz visible. Por lo general este tipo de descargas no se produce en máquinas rotativas, aunque sí en elementos externos del circuito de ensayos (cables destrenzados, etc...) que pueden inducir a error.

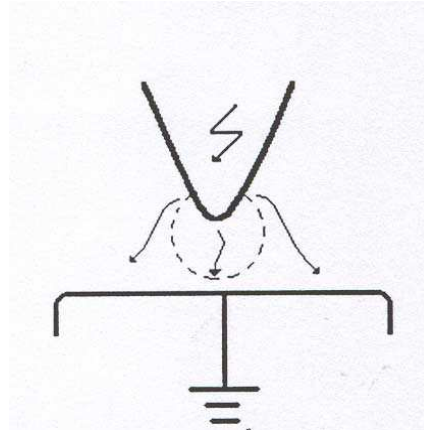


Figura 2.10. Fenómeno de descarga de efecto corona.

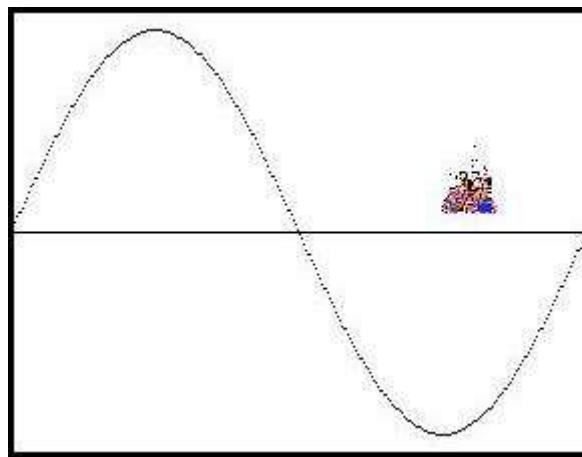


Figura 2.11. Ejemplo de patrón de descargas por efecto corona en ensayo punta-placa.

La existencia de descargas internas es, en general, una situación más peligrosa que la presencia de descargas superficiales y efecto corona, ya que la actividad de descarga se concentra en puntos débiles del material, mientras que en las otras dos se distribuye en zonas más amplias del dieléctrico.

En el interior de un material dieléctrico se pueden dar diferentes tipos de defectos en los cuales se generan DP, por ello, en dieléctricos reales, aparecerán diferentes fuentes de descargas de forma simultánea para determinada tensión aplicada.

A continuación presentamos algunos factores que afectan el registro de DP:

- Tensión del estator, su aumento incrementa mucho las DP.

- Presión del gas; su aumento de presión del gas reduce mucho las DP, ([Khalifa, 1990]).
- Humedad: el aumento de humedad en las vacuolas reduce las DP por fugas de cargas libres superficiales. Aún así, la humedad degrada a la larga al aislamiento, provocando contorneos localizados en superficies (“Tracking”).
- Temperatura bobinados: si hay deslaminación previa del aislante, al aumentar la temperatura caen las DP al encoger los huecos con la dilatación de los componentes. Por otro lado, el efecto continuado del envejecimiento térmico, puede provocar la aparición de nuevas fuentes de DP.
- Carga de la máquina: si las barras están sueltas en las ranuras, el aumento de carga aumentará las fuerzas magnéticas en ellas y por tanto las vibraciones dentro de las ranuras, aumentando las DP.

2.1.3.- Consecuencias de las Descargas Parciales.

Las descargas parciales provocan el deterioro del medio en que se producen, aunque en ocasiones es necesario su uso para un fin distinto como la xerografía o la iluminación. Las principales consecuencias de las DP son:

- Radiación ultra-violeta y rayos X.
- Formación y emisión de gases como ácido nítrico y ozono que provoca un ataque químico.
- Potencia eléctrica disipada en forma de calor. Calentamiento del dieléctrico.
- Erosión del material provocada por impacto directo de electrones de alta energía o iones.
- Ruido en frecuencias audibles o ultrasónicas.

Todos estos mecanismos son capaces de acabar con el buen estado del aislante y pueden ocurrir en gran cantidad de dispositivos eléctricos, como máquinas rotativas, transformadores, cables de alta tensión, etc.

2.2.- Aislamiento estatórico y descargas parciales.

Está documentado que gran parte de los fallos imprevistos de maquinaria rotativa aparecen como consecuencia de faltas en los sistemas de aislamiento de ésta ([Stone, 2004]). Durante el funcionamiento, el devanado estatórico está expuesto a procesos mecánicos, térmicos y eléctricos, que pueden reducir la vida de la máquina si se exceden unos límites aceptables, ya que, si no son controlados contribuyen a la degradación de los materiales de la máquina y por ello al fallo eléctrico. Esta degradación viene precedida de una fase durante la cual las descargas parciales pueden ser detectadas y monitorizadas. Un síntoma de una deficiencia en el aislante de este tipo de máquinas es su existencia. Incluso cuando las DP no son la causa inicial del fallo y son la consecuencia de otras perturbaciones, contribuyen al proceso de degradación.

Hay que distinguir entre los sistemas de aislamiento y los materiales de aislamiento. Un sistema de aislamiento está formado por uno o más materiales aislantes, englobando también la geometría de los mismos. Sin embargo, la vida de un devanado está determinada por la capacidad del sistema y no por la de sus componentes. Por eso, los test en materiales no son suficientes, por si solos, para determinar la vida útil de un sistema de aislamiento.

2.2.1.- Materiales aislantes.

Un material de aislamiento eléctrico es una sustancia en la que la conductividad eléctrica es muy pequeña, y evita conexiones eléctricas indeseadas. Un sistema de aislamiento eléctrico es un material aislante o una combinación adecuada de materiales aislantes diseñados específicamente para realizar las funciones necesarias de separación de dos o más elementos a diferente potencial eléctrico.

La selección de sistemas de aislamiento eléctrico siempre dependerá de los materiales disponibles, las necesidades técnicas del motor o generador y de los costes relativos de los procesos de fabricación. En los primeros años de la industria, había una dependencia casi total de materiales naturales y mucho ensayo-error para encontrar mediante experimentación qué sistemas cumplían los criterios mínimos de diseño.

En un entorno cada vez más competitivo y con el conocimiento cada vez mayor de las capacidades y limitaciones de los materiales naturales existentes, se desarrollan combinaciones que pueden operar sin problemas con la influencia de elevados mecanismos de deterioro. A continuación se explican los diferentes tipos de materiales aislantes asociados a las máquinas rotativas [Stone, 2004].

- Materiales naturales.

Los primeros sistemas de aislamiento utilizaban materiales que eran comunes para otros usos, estos incluían fibras naturales de celulosa, algodón, lana, seda, lino, amianto, cuero.... además de resinas naturales derivadas de los árboles, plantas, insectos y depósitos de petróleo que combinadas con las fibras formaban materiales aislantes. Sólidos tales como arena, mica, amianto, cuarzo y otros minerales a menudo eran utilizados como relleno en tierra o polvo. Las modificaciones en la elección de la resina y la mezcla se utilizaban para cambiar las propiedades para usos específicos.

La incorporación de aceites secantes en el asfalto, fue dirigido a mejorar la debilidad térmica de los barnices o resinas. Los asfaltos naturales son materiales termoplásticos que se funden por calentamiento intenso, pero que mezclados con mica endurecen lentamente durante el calentamiento de servicio aunque no llegarán a convertirse en materiales termoestables.

- Películas plásticas y telas.

En 1950, los ingenieros de aislamiento comenzaron a investigar sobre nuevos materiales fabricados con películas de plástico sintético y, más tarde, tela sin tejer a base de polímero de fibra, siendo ofrecidos por los proveedores como aislamiento de espiras, ranuras y fases para motores de inducción. Los nuevos materiales ofrecen un potencial de costos más bajos, mejor rendimiento, y facilidad de fabricación.

- Materiales sintéticos.

El nuevo equipo de acabados y barnices aislantes sintéticos encontraron uso en muchas máquinas rotativas. Los barnices se utilizaron para la inmersión y revestimiento de bobinas, así como aportar versiones mejoradas de los materiales aislantes como el de batista barnizada. Los más utilizados son los poliésteres, las siliconas, resinas epoxi, el poliuretano, el polipropileno y el policarbonato.

- Resinas sintéticas líquidas.

Uno de los principales avances fue la sustitución de resinas naturales y sintéticas con base disolvente por resinas sintéticas sin disolvente. Estos materiales son normalmente termoestables bajo la acción del calor, catalizadores, endurecedores, o radiación. Además de mejorar la estabilidad térmica y las propiedades físicas, la eliminación de los disolventes hace de su aplicación más respetuosa con el medio ambiente y menos probable que se formen huecos en el aislamiento de tierra. Existen dos familias de resinas que son muy importantes para el aislamiento de tierra en devanados ordenados:

- Poliésteres.

Los primeros usos fueron aplicaciones militares, combinándolos con fibras de vidrio para la construcción de laminados fuertes. Su llegada, sin embargo, es muy importante en el desarrollo de aislantes de bobina.

Estas láminas se utilizan para envolver bobinas con un número determinado de vueltas dependiendo de la tensión de servicio. Es un material muy flexible, pero que si no se almacena correctamente puede llegar a deteriorarse de manera significativa, y más si está expuesto a temperaturas extremas durante un largo periodo de tiempo.

- Resinas epoxi.

La mayoría de las resinas epoxi eran termoplásticos sólidos a temperatura ambiente y no eran muy adecuados para su uso como resinas de impregnación de baja viscosidad. Es uno de los principales materiales que se utilizan en el sistema VPI explicado en la sección 2.2.2.

- Mica.

Se caracteriza principalmente por tener una división basal perfecta, de modo que puede dividirse fácilmente en un gran número de delgadas láminas resistentes y flexibles. Presenta una excelente resistencia a la temperatura. Químicamente, las micas son silicatos complejos de aluminio con potasio, magnesio, hierro, sodio, litio, flúor, y trazas de otros elementos.

- Divisiones de mica.

Las divisiones de mica han sido o siguen siendo utilizadas en muchas aplicaciones de aislamiento eléctrico. Estas incluyen condensadores electrónicos, transistores, aislamientos, etc. El uso en máquinas rotativas es generalmente en forma de hojas o cintas con los soportes de apoyo e impregnación de resina o como hojas moldeadas con resinas de unión.

- Papel de mica.

Dependiendo del uso final del papel, se utilizan muchas combinaciones de materiales diferentes como resinas y aglutinantes sobre su superficie. Estas adiciones mejoran la fuerza y proporcionan una protección mecánica del producto para corte posterior en cintas para el aislamiento de bobinas de la máquina.

Los papeles de mica tienen un espesor uniforme y presentan gran rigidez dieléctrica. Es necesario menos material total y menos espesor para alcanzar el mismo valor de aislamiento si los comparamos con las escamas de mica.

- Fibra de vidrio.

La fibra de vidrio se utilizaba para reforzar resinas de poliéster, inicialmente como laminados para usos militares. Muchas resinas se usan con fibra de vidrio, tanto en hojas planas y en formas moldeadas para aplicaciones eléctricas.

La mayoría de las fibras de vidrio utilizadas para aislamiento eléctrico se hacen de una cal (alúmina). Las fibras no son frágiles y son muy resistentes a la tracción en comparación con el vidrio a granel. Como un material inorgánico, el vidrio es resistente al ataque de las DP. Puede ser gravemente deteriorada si entra en contacto con agua, por ello se les aplica un tratamiento superficial para protegerlo que repele la humedad.

- Laminados.

La producción de laminados para aislamiento eléctrico se realiza generalmente usando polímeros termo-endurecibles. Los laminados son fabricados generalmente con papel impregnado o a partir de rollos de tela con una solución de resina termo-endurecible.

La Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos (NEMA, de EEUU) ha establecido muchas clasificaciones de estos productos laminados de acuerdo con los refuerzos y las resinas utilizadas en su construcción y sus propiedades térmicas, eléctricas y mecánicas. Los laminados se han convertido en aislamiento de espiras del rotor y en tiras de relleno de ranuras de bobinas.

2.2.2.- Sistemas de aislamiento del devanado estático.

Los motores y generadores de baja tensión con devanado aleatorio suelen utilizar conductores de sección circular, mientras que las máquinas de alta tensión utilizan conductores rectangulares en sus devanados ordenados. El aislamiento de los conductores en las máquinas con devanado aleatorio debe ser capaz de soportar la diferencia de tensión entre el principio y el final de cada bobina, ya que el proceso aleatorio de bobinado puede alcanzar esos terminales juntos en la misma bobina. Las resinas naturales y barnices utilizados para las bobinas no eran muy buenos como recubrimiento aislante de los hilos. En cambio, las resinas naturales se utilizaron para impregnar esos hilos magnéticos, ya fueran redondos o rectangulares, siempre que se combinaran con materiales como el algodón, la seda y las fibras de lino. En comparación con la actualidad el esmalte que se utilizaba para el aislamiento de los cables era más grueso, más rígido, y tenía una capacidad térmica mucho más baja. Los modernos esmaltes sintéticos mejoran esas propiedades y se aplican mediante varias inmersiones en un tanque y posteriores secados en un horno especial, que producen un recubrimiento total. Al tratarse de un esmalte con mejores propiedades no es necesario un recubrimiento de igual grosor al utilizado en la antigüedad, lo que se traduce en menor rigidez y mayor facilidad de manipulación durante el montaje. Los hornos de secado de alambre se utilizan tanto para hilo redondo o rectangular [Stone, 2004].

- Primeros sistemas.

Los primeros sistemas de aislamiento utilizaban una combinación de papel para el aislamiento de las bobinas de alta tensión o las barras. Este papel al principio era aplicado a mano para bobinas pequeñas, pero para bobinas grandes se necesitaba una máquina que hacía girar la bobina o la barra y así colocar el envoltorio.

- Sistemas de mica asfalto.

En los años 20, las resinas asfálticas se combinaban con divisiones de mica para mejorar el aislamiento a tierra de los devanados estáticos. Las láminas de mica se recubrían por ambos lados con papel de celulosa. Aunque las prácticas difieren entre los fabricantes, un método común que estuvo en uso hasta la década de 1980 fue el uso de barniz asfáltico modificado con tolueno para impregnar la hoja de mica.

La mayoría de los fabricantes de generadores aplicaban los nuevos materiales a mano y el recubrimiento de la bobina a través de un proceso de impregnación al vacío utilizando barnices asfálticos. El cambio a una construcción de barras no se produjo hasta que el tamaño de los generadores aumentó y las bobinas eran demasiado grandes para su manipulación durante el montaje en el estator. Se enrollan las bobinas completas, aisladas con ligantes asfálticos y copos de mica, y se realiza un precalentamiento de las bobinas con una elevada corriente, que suaviza el aislamiento termoplástico y permite un cierto movimiento relativo dentro del aislamiento.

- Sistemas termoestables de barras y bobinas individuales.

Para prevenir la separación de cintas se desarrolló un aislamiento de tierra termoestable, produciendo un material rígido. Las primeras generaciones de aislamiento termoestable utilizaron resinas sintéticas que se ablandaban a temperaturas moderadamente altas, pero no se derretían como algunas de las resinas asfálticas. La

temperatura de ablandamiento de las resinas termoestables, se denomina temperatura de transición vítrea. Es la temperatura a la que cambia la resina de un estado rígido y cristalino a una goma de estado amorfo. Se suelen utilizar resinas que tienen una temperatura de transición vítrea por encima de la temperatura de servicio de aislamiento. Estos sistemas de aislamiento son más fuertes y menos flexibles a temperatura ambiente.

- Tratamiento VPI o sistema global VPI.

El alto coste de fabricar estatores con devanado ordenado cuyas bobinas o barras son impregnadas o recubiertas totalmente antes de la inserción en las ranuras condujo al desarrollo de otras técnicas. Una de ellas fue el sistema VPI (Vacuum pressure impregnation), Impregnación a Presión de Vacío, menos costoso y que facilita la fabricación porque todas las conexiones del bobinado y las barras se pueden hacer antes de la impregnación final.

En esta técnica, el bobinado se coloca en un gran tanque donde se le aplica el recubrimiento. El estator está totalmente inundado de una resina de baja viscosidad, presurizada hasta 0,6 MPa con un gas no reactivo, que impregna todo el aislamiento de tierra, el aislamiento bobina a bobina y el aislamiento de fase-tierra. Después drenamos el exceso de resina y el estator puede ser horneado a temperaturas de 60 a 100 °C para fijar el recubrimiento.

A principios de los años 90, los fabricantes tenían la capacidad de aplicar el tratamiento sobre estatores de un máximo de 300 MVA. La mayoría de los estatores con devanado ordenado fabricados actualmente emplean este sistema.

La resina empleada para el proceso de VPI puede ser epoxi de baja viscosidad o poliéster. El poliéster es más barato y requiere controles de fabricación menos estrictas que el epoxi. Hoy en día, la mayoría de los fabricantes suelen preferir epoxi debido a su fuerza y resistencia química.

2.2.3.- Tipos de sistemas de aislamiento del devanado estatórico.

Los sistemas de aislamiento de un devanado estatórico contienen diferentes componentes y características que intentan evitar que se produzcan fallos eléctricos.

Los componentes básicos que permiten garantizar la calidad del aislamiento estatórico son:

- Aislante de hilo (strand insulation). Se trata del recubrimiento exterior de cada hilo conductor que forma una bobina. En el caso de hilos magnéticos, se trata del esmalte con el que se fabrican.

- Aislante de espira (turn insulation). Es el material aislante que recubre una espira. Se encuentra alrededor de los apilamientos de cobre y se utiliza sobre todo cuando las espiras están formadas por varios conductores. En caso de que este aislamiento separe bobinas de diferentes fases, tendrá mayor rigidez dieléctrica. Para este tipo de aislantes se utilizan laminados fabricados a partir de

polímeros termo-endurecibles y en la actualidad se aplican recubrimientos termoplásticos.

- Aislante a tierra (groundwall insulation). Impide que las fases del devanado tengan contacto con las paredes metálicas de las ranuras del estator. Para este tipo de aislante se utiliza papel de mica combinado con algún tipo de resina o directamente resinas sintéticas líquidas termo-endurecibles como puede ser un poliéster o resina epoxi.

- Cubierta semiconductora (semiconductive coating): Es una capa que cubre la superficie de las bobinas del estator para prevenir descargas parciales, rellenando los espacios de aire entre las bobinas y el núcleo. Sólo está presente en máquinas de AT (devanados preformados).

- Cuñas de apriete (slot Wedges): Dan rigidez mecánica a la bobina dentro de la ranura. Su objetivo es evitar o mitigar las vibraciones de los devanados dentro de las bobinas debidas a fuerzas electromecánicas. De especial importancia en máquinas de AT (devanados preformados).

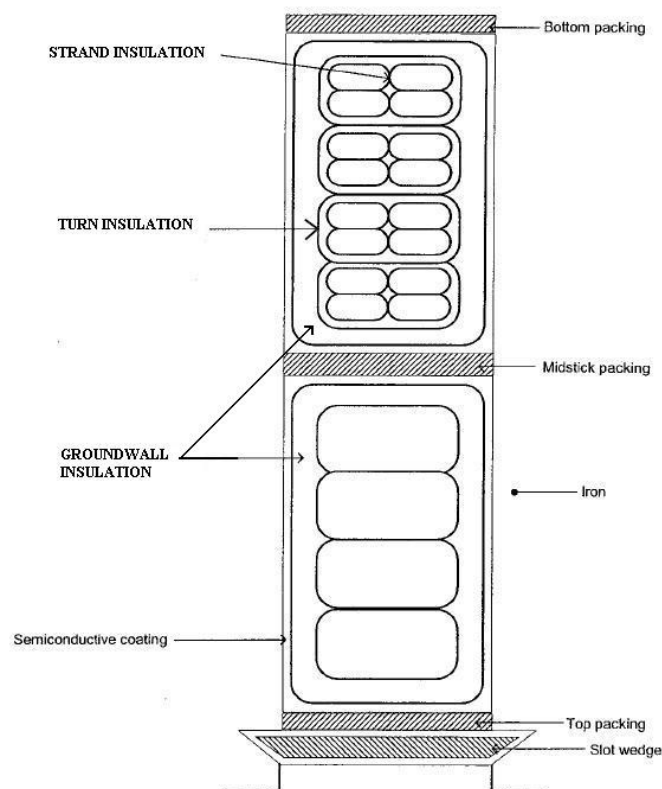


Figura 2.12. Detalle de los diferentes aislantes que se pueden encontrar en un devanado estatórico ([Stone, 2004]).

2.3.- Principales procesos de envejecimiento.

Existen gran cantidad de mecanismos que pueden ayudar al envejecimiento prematuro de los sistemas de aislamiento de una máquina eléctrica rotativa, y los describiremos a continuación. Si el fallo es causado por un envejecimiento constante, el tiempo de fallo será proporcional al número de horas de funcionamiento del motor o generador. En caso contrario, si se debe a un estrés transitorio ó cíclico, el tiempo será proporcional al número de transitorios que se produzcan. Normalmente, los distintos mecanismos de envejecimiento que se describen a continuación interactúan entre sí, dificultando el diagnóstico de una máquina eléctrica.

- Deterioro térmico genérico.

El deterioro térmico es una de las principales y más reconocidas causas del deterioro gradual del aislamiento y posterior fallo. La alta temperatura resultante de las corrientes de Foucault y las pérdidas de carga en los conductores de cobre favorece la aparición de reacciones químicas (por ejemplo, oxidación en máquinas refrigeradas por aire) cuando se supera la temperatura normal de funcionamiento. La oxidación causa fragilidad en el aislante (las moléculas del material adquieren energía que da lugar a rupturas de enlaces), produciéndose delaminación.

Es evidente que a mayor temperatura, menor es la vida útil del aislamiento y, por lo tanto, el devanado. Por el contrario, a veces las altas temperaturas protegen las máquinas de la humedad, causante de múltiples fallos eléctricos, además de reducir el tamaño de las vacuolas de los sistemas de aislamiento (responsables de la aparición de DPs) en algunos casos.

- Deterioro eléctrico genérico.

Todo sistema de aislamiento tiene una tensión máxima de operación, conocida como tensión de ruptura. Tomando en consideración la operación en condiciones nominales de la máquina, este mecanismo tiene poco impacto sobre el envejecimiento del aislante en máquinas de tensiones inferiores a 1kV nominal (exceptuando los devanados alimentados por inversores). Sin embargo, en máquinas con una tensión nominal superior tiene una gran importancia debido a que el espesor del aislante depende de la tensión de alimentación. Gran culpa de ese envejecimiento del aislante por la alimentación la tienen las descargas parciales, fenómeno analizado con detenimiento en este proyecto. En la mayoría de los casos al aumentar la tensión alimentación, las DP aumentan considerablemente, con el consiguiente deterioro del aislante, incluso causando perforaciones con el tiempo a partir de vacuolas o de descargas superficiales y provocando averías. En primera aproximación, para tensiones superiores a las nominales, este envejecimiento se puede modelar la Ley de la potencia inversa:

$$L = cE^n$$

L: Tiempo de vida del aislamiento en horas.

c: Constante.

E: Campo aplicado (kV/mm).

n: Constante de la regla de potencia.

Esto sólo puede ser aplicable a condiciones transitorias poco frecuentes (alimentación con inversores de un motor, transitorios tipo rayo o maniobra...), de manera que a tensión nominal, una máquina debe estar diseñada para operar sin envejecer ostensiblemente. No obstante, para tensiones nominales, las máquinas de Alta tensión sí sufren de DPs, que en algunos casos, pueden provocar su fallo prematuro.

- Deterioro mecánico genérico.

Hay tres fuentes principales de estrés mecánico.

- El sistema de aislamiento del rotor está sometido a una fuerza centrífuga enorme, la cual deteriora el material.

- Los campos magnéticos que se generan debido a la corriente, hacen vibrar las bobinas en las ranuras erosionando el aislante y provocando averías. Esto se produce con frecuencia en las terminaciones de los devanados.

- Los transitorios son una causa importante de envejecimiento mecánico, modifican el sincronismo de máquinas síncronas, introduciendo corrientes mucho mayores que en condiciones normales que provocan un sobreesfuerzo mecánico, lo que provoca una degradación mecánica de los materiales aislantes.

- Deterioro genérico por factores ambientales.

Pueden ser un conjunto de factores del ambiente que rodea a la máquina y que pueden conducirla al fallo:

- Humedad en los devanados. De especial importancia en máquinas refrigeradas con agua.
- Temperatura ambiente anormal ($T < -20^{\circ}$, $T > 50^{\circ}$).
- Aceite de rodamientos o juntas.
- Productos químicos abrasivos o reactivos con materiales aislantes de la máquina.
- Partículas abrasivas en los gases de refrigeración.
- Residuos producidos por fricción de las escobillas dentro de la máquina.
- Suciedad introducida en la máquina.
- Radiación ionizante.

Cualquiera de estos factores puede afectar de forma negativa al aislamiento, y aunque no causan envejecimiento del material por sí solos, sí lo aceleran en el caso de producirse a la vez que otras perturbaciones.

La avería de un devanado no sólo depende de un único factor, depende de varios. Para acercarnos a unas condiciones normales de funcionamiento debemos utilizar varios factores de envejecimiento a la vez en los ensayos pertinentes de una máquina. Así se conseguirá que los resultados de los test se asemejen lo máximo posible a la realidad. Además estos factores se ajustan a niveles superiores a las condiciones normales para acelerar el deterioro y conseguir que se produzca en un tiempo menor.

La interacción entre distintos factores de envejecimiento es muy importante. La temperatura es uno de los más importantes porque se produce con el funcionamiento normal de la máquina. Además la propia alimentación de la máquina genera deterioro mecánico, debido a las vibraciones de los conductores. Estos parámetros normales de funcionamiento, junto con la actividad de DP's (inevitables en máquinas de AT) son responsables de fallos anticipados de los sistemas de aislamiento en condiciones nominales.

2.3.1.- Mecanismos de ruptura y reparación de devanados estáticos.

En este capítulo se presentan los principales mecanismos de envejecimiento y fallo de los bobinados del estator, así como las opciones de reparación asociadas a cada mecanismo que altere su funcionamiento para extender la vida del devanado. Los mecanismos discutidos aquí son los que se deben al envejecimiento progresivo del estator. Algunos de estos mecanismos sólo ocurren en un determinado tipo de estator (ordenado o aleatorio) y para otros es indiferente.

- Temperatura.

El deterioro térmico ocurre en cualquier tipo de estator, siendo la causa más común de avería en el estator y más aún si la máquina está refrigerada por aire. Depende de la naturaleza del material aislante (termoestable o termoplástico) y del ambiente en el que opera la máquina. Este deterioro por temperatura de funcionamiento, surge al iniciar o acelerar una reacción química que hace que el material aislante pierda sus propiedades, aumente su fragilidad y por lo tanto disminuya la resistencia a esfuerzos mecánicos. La elevada temperatura provoca una ruptura del recubrimiento aislante de los conductores y hace que se produzcan conexiones inesperadas entre conductores.

Cuanto mayor sea la temperatura, mayor es la velocidad a la que se produce la reacción química, y por lo tanto menor será el tiempo en que se degrada el sistema de aislamiento. Es evidente que cuanto mejor sea la capacidad térmica del aislamiento, más tiempo soportará a una temperatura de operación determinada. Este deterioro del aislamiento debido a la temperatura puede resultar en un fallo en unos meses o aparecer después de décadas, todo depende de los materiales utilizados y la temperatura de funcionamiento.

En los devanados ordenados se reduce la fuerza de unión entre espiras y se produce una delaminación del aislamiento de tierra.

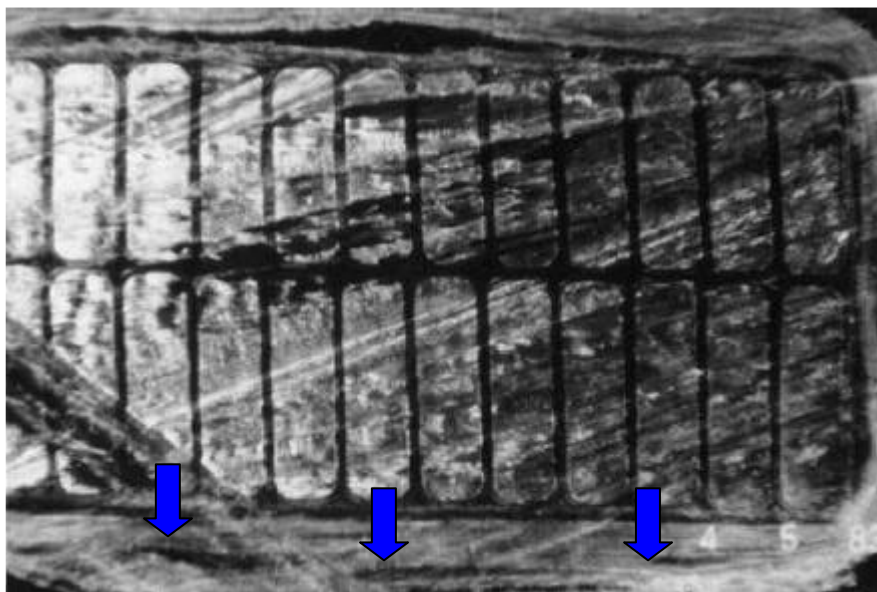


Figura 2.13. Detalle de deterioro en el aislante a tierra en una sección de una barra causado por excesiva temperatura ([Stone, 2004]).

Las causas del aumento de temperatura en una máquina pueden ser:

- Sobrecarga de la máquina.
- Errores de diseño. Conductores muy finos, refrigeración inadecuada.
- Errores de fabricación del aislamiento.
- Calentamiento debido a numerosos arranques y paradas sucesivos en motores de inducción.
- Altas corrientes de armónicos.
- Desequilibrio de tensiones entre fases.
- Barras o bobinas sueltas en el devanado que reducen la transferencia de calor.
- Suciedad que no deja que la refrigeración indirecta funcione correctamente.
- Oxido en los canales por los que fluye el agua de la refrigeración.

Los signos visuales del deterioro del aislante de los devanados dependerán del aislamiento y del tipo de devanado. Se pueden observar grietas y desprendimientos en el recubrimiento aislante de los conductores, además de decoloración y pérdida de brillo en el barniz.

Dependiendo de la causa del sobrecalentamiento de la máquina, habrá que actuar de una forma distinta en cada caso. Antes de proceder a la reparación del devanado tenemos que tener muy claro la causa que ha ocasionado el deterioro, excepto si vamos a rebobinar el devanado. Hay que tener en cuenta que el deterioro del aislamiento térmico no es reversible. En ocasiones se inyecta epoxy en la zona dañada para reparar el aislamiento de tierra deteriorado y así se evita el alto coste de rebobinado, pero no es una solución eficiente a largo plazo.

Se utilizan algunos métodos para evitar este deterioro.

- Limpieza de los intercambiadores de calor.
- Realizar un nuevo tratamiento VPI para mejorar el contacto térmico entre las bobinas y el núcleo.

- Mejora de los intercambiadores.
- Instalar enfriadores en la refrigeración.
- Reducir la carga máxima permitida.
- Ajustar el factor de potencia en máquinas síncronas.

- Ciclaje térmico.

Suele ocurrir en máquinas con un núcleo estatórico largo y en máquinas en que se produzcan arrancadas y paradas muy rápidas o rápidos y múltiples cambios de carga, así como hidrogeneradores grandes refrigerados por aire y los grandes generadores de turbina de gas.

En una oscilación de carga, la corriente del estator pasa de ser mínima, a ser de plena carga, en unos minutos lo que provoca que aumente rápidamente la temperatura de los conductores y se expandan. Al mismo tiempo el material aislante, epoxy-mica, está a una menor temperatura y necesitará unos minutos más para incrementarla. La consecuencia es que la temperatura aumenta, el cobre se expande pero el aislante no expande lo suficiente, por tener un coeficiente de expansión térmica inferior, y se crea un sobreesfuerzo entre el conductor y el aislante que degrada éste último. Incluso se desprenden partes del recubrimiento.

Cuando la fatiga de este material es muy elevada, se producen vibraciones de los conductores produciéndose una degradación aún mayor del aislante. Además se pueden llegar a producir DP en ese espacio de aire causando una perforación en el aislamiento a tierra que desencadenará un fallo. Si la operación convencional de la máquina incluye muchos cambios de carga, este mecanismo toma gran protagonismo.

Las causas del fallo son una combinación de:

- Cambios de carga demasiado rápidos para el diseño.
- Múltiples cambios de carga en condiciones normales.
- Funcionamiento a alta temperatura.
- Diseño inadecuado del sistema de aislamiento para resistir corrientes cíclicas.

Los síntomas de deterioro del material aislante se pueden observar a simple vista. Son bastante parecidos a los anteriormente descritos con el deterioro térmico, grietas y expansión del aislante, signos de abrasión, polvo y decoloración. Los efectos de ciclos térmicos son irreversibles, por lo que el estator bobinado no puede ser recuperado a sus condiciones iniciales de manufactura si el proceso ya ha causado un deterioro significativo. Sin embargo, hay varios métodos disponibles para frenar el proceso:

- Disminución de la tasa de incremento y disminución de la alimentación.
- Disminución de la temperatura máxima de funcionamiento mediante la reducción de la carga admisible.
- Para estatores VPI, inyección de epoxi o caucho de silicona en las ranuras entre las bobinas y el núcleo.
- Llenar las grietas con goma de silicona o de otras resinas compatibles para mejorar la resistencia eléctrica del aislamiento de la bobina.

- Impregnación inadecuada.

La mayoría de los estatores devanados aleatorios se sumergen en una resina o barniz, para proteger el devanado de la suciedad y la humedad, mejorar la transferencia de calor hasta el núcleo, y mantener los bobinados apretados en la ranura para evitar la abrasión de las vibraciones. Por la misma razón, los devanados ordenados utilizan el Sistema VPI para realizar el recubrimiento. Además la impregnación también evita las descargas parciales dentro del aislante a tierra mediante la prevención de las bolsas de aire se produzcan.

Los devanados aleatorios con fallos en su recubrimiento son mucho más propensos a fallar debido a la suciedad, la contaminación, el aceite y la humedad. Este fallo en la impregnación no es muy usual pero se puede producir. Si la impregnación es pobre, entonces estas imperfecciones en el aislamiento, conducen al cortocircuito de las espiras y, por tanto, al fallo total del sistema. Del mismo modo, si las espiras no se adhieren entre sí y al núcleo, las fuerzas electro-magnéticas debido al arranque de motores o corrientes de funcionamiento normales causan las vibraciones que degradan el recubrimiento aislante por lo que existirá actividad de DP debido a bolsas de aire entre el cobre y el núcleo.

A continuación las causas de este deterioro:

- Viscosidad de la resina o barniz demasiado alta o baja.
- Proceso de fabricación del devanado inadecuado.
- Uso de un aislamiento de los conductores que no es químicamente compatible con la resina o barniz.
- Una temperatura de horno que es demasiado alta o demasiado baja, o un tiempo de horneado que es demasiado corto.

Este tipo de defecto es fácilmente observable, ya que los intersticios no están rellenos de resina, y no hay brillo en las bobinas y el núcleo.

Un devanado estatórico aleatorio a menudo puede ser totalmente restaurado por una repetición del baño y horneado si la falla no ha ocurrido todavía. Sin embargo, las bobinas de un devanado ordenado no tienen posibilidades de ser reparadas correctamente una vez realizada la impregnación inicial. Esto se debe a que la impregnación original normalmente bloquea el flujo de resina a los puntos próximos a los conductores de cobre.

- Deterioro del recubrimiento semiconductor.

Reacciones químicas que se producen en el interior de la máquina durante su funcionamiento normal que originan un deterioro del recubrimiento semiconductor en ausencia de vibraciones. Ocurre sobretodo en máquinas refrigeradas por aire con devanado ordenado y con una tensión superior a 6 kV.

En una máquina refrigerada por aire, las DP crean ozono, el cual es muy reactivo, y combinado con otros gases se convierte en una sustancia que es muy perjudicial para gran parte de los materiales que podemos encontrar en una máquina de

este tipo. Debido al deterioro que produce esta sustancia química, los devanados que se encontraban ajustados en sus ranuras, comienzan a vibrar, lo que provoca una degradación más rápida que el propio proceso de DP.

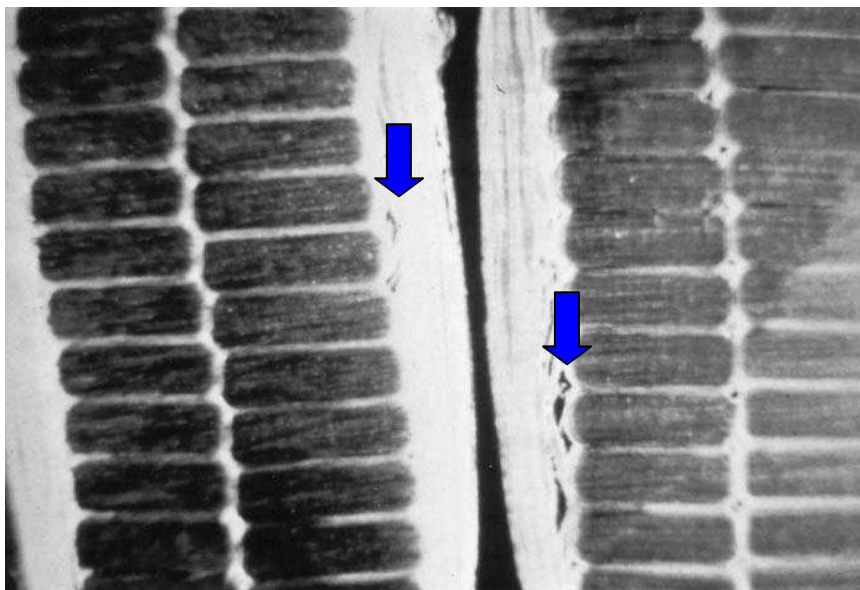


Figura 2.14. Detalle del deterioro del recubrimiento semiconductor [Stone, 2004].

La principal causa de este tipo de degradación es un defecto de fabricación. Si realizamos una inspección visual del estator, este problema es fácilmente detectable, ya que el recubrimiento, que es normalmente negro, cambia de color. O bien se puede detectar mediante un análisis de DP. La única forma de evitar esta degradación es una minuciosa fabricación, realizando medidas de resistencia eléctrica en las bobinas durante el montaje para comprobar que todo está correcto.

Si la máquina está funcionando, no existe un medio de reparación para devolver la máquina a un estado correcto, a menos que se desarme completamente. Se puede reparar, aunque no completamente, inyectando barniz cargado de carbón, caucho de silicona o epoxy en las ranuras del estator, pero también requiere el desmontaje de la máquina y no es una solución definitiva a largo plazo.

- Sobretensiones repetitivas.

Las sobretensiones incrementan el deterioro gradual de equipamientos eléctricos. Tradicionalmente han sido estudiados los impulsos tipo rayo y maniobra (típicos en redes eléctricas, [Khalifa, 1990]) a la hora de caracterizar la capacidad de aislamiento de máquinas, cables y aparatos eléctricos. No obstante, estos transitorios son poco habituales en máquinas eléctricas rotativas, pues éstas suelen estar protegidas por transformadores que sí los pueden sufrir. Sin embargo, los nuevos desarrollos en accionamientos eléctricos centrados en nuevos convertidores electrónicos de potencia, han introducido nuevos esfuerzos inesperados en la alimentación de rotores y especialmente en estatores de motores de BT. Estos nuevos transitorios son de menor magnitud absoluta (no así relativa a la tensión nominal), pero tienen tiempos de conmutación muy inferiores y se repiten muchas veces en un ciclo de red (por ejemplo, en los inversores PWM).

Existen varios tipos de Sobretensiones dependiendo del aislamiento en el que se produzcan:

- Aislante del conductor. Existe una distribución anormal de la tensión a través de las primeras espiras de la bobina, esto provoca que aparezcan descargas parciales entre los conductores.
- Aislamiento fase y tierra. Se producen DP en el aire que rodea el hilo magnético, cuando existe un espacio inadecuado de aislante entre fases o la tierra, debido a la pequeña sección del hilo.

Este deterioro produce polvo sobre el aislante del hilo magnético entre las últimas espiras de la fase al estar en contacto diferentes bobinas.

A continuación detallamos unas normas para remediar este fenómeno:

- Cambiar la longitud del cable entre inversor y máquina y / o puesta a tierra.
- Instalar un filtro de paso bajo entre inversor y el motor para alargar el tiempo de conmutaciones de las sobretensiones.
- Uso de un hilo conductor más resistente a las DP.
- Aumentar la distancia entre las espiras adyacentes en el final del devanado y entre otras bobinas y fases.
- Impregnación del estator para reducir la probabilidad de que las bolsas de aire se produzcan en lugares críticos.

- Contaminación.

La contaminación es un grave problema que nos producirá otros, como el deterioro por temperatura o el ataque químico. Esta contaminación permite que se produzcan corrientes sobre las superficies del aislante y causen un fallo a tierra.

Este problema se produce sobre todo en motores y generadores de alta tensión que están refrigerados por aire del entorno en que se encuentran, y en las que puede entrar suciedad como tierra, insectos, polvo, etc. Esta suciedad mezclada con humedad del ambiente o aceite proveniente de rodamientos u otras piezas, puede convertirse en un recubrimiento conductor de electricidad. En estatores con devanado ordenado, el problema suele ocurrir en el extremo de las bobinas.

El síntoma más evidente de este problema es la presencia de contaminación, que se puede observar a simple vista. Aparece en la superficie del devanado como una capa oscura. Los test de resistencia de aislamiento e índice de polarización (ver sección 2.4) del aislante son un mecanismo muy útil para detectar este problema.

Es uno de los problemas más fáciles de reparar, ya que se soluciona simplemente realizando una limpieza del estator, y para ello se utiliza normalmente disolventes, hielo seco, agua a presión y vapor, aunque el agua o vapor de agua no es conveniente para aislantes viejos. Se utilizan los siguientes métodos para evitar que se produzcan fallos en la máquina por este motivo:

- Instalación de filtros de aire en máquinas refrigeradas con aire ambiente.

- Circuito de refrigeración cerrado en ambientes sucios.
- Utilización de cojinetes sellados.
- Limpieza de la suciedad que puedan generar las escobillas de la máquina, en caso que las tenga.

- Partículas abrasivas.

Las partículas abrasivas que se introduzcan en la refrigeración pueden causar graves daños a los sistemas aislantes del estator. Es más probable que ocurra en máquinas refrigeradas por aire del ambiente. La arena es una de las partículas más peligrosas en estos casos, ya que degrada los sistemas aislantes mediante su paso suspendido en el aire, desgastando el material y provocando defectos a tierra.

Este fenómeno se produce en ambientes agresivos donde el aire contiene partículas abrasivas. En una simple inspección visual podremos observar fácilmente los desperfectos que crea este fenómeno.

Para evitar este proceso de degradación, se colocan filtros a la entrada de la refrigeración y en el caso de presentar una degradación severa, se procederá a reponer el recubrimiento que haya sido debilitado.

Si un devanado aleatorio ha sufrido la abrasión, a continuación, un baño o el tratamiento VPI restaurará el aislamiento.

- Ataque químico.

El ataque químico describe el deterioro del aislamiento que puede ocurrir si el aislamiento está expuesto a un entorno en el que los productos químicos tales como ácidos, pinturas y disolventes, así como aceite y el agua, están presentes. Este problema lo pueden sufrir todos los tipos de bobinados del estator. La mayoría de los sistemas de aislamiento antiguos son propensos a la degradación inducida químicamente debido a la presencia de disolventes, aceite, agua u otros químicos.

Si la resistencia mecánica o eléctrica del aislamiento disminuye de manera significativa debido al deterioro químico, una alta tensión de alimentación o las fuerzas de carácter mecánico pueden perforar o romper el aislamiento.

La causa raíz del ataque químico es la presencia de aceite, agua y otros productos químicos, provenientes de la lubricación de piezas de la máquina, de la propia refrigeración o de la limpieza durante el mantenimiento.

En una inspección visual, el aislamiento puede estar descolorido o tener hinchazón y si se golpea, puede sonar hueco. Si es fácil de raspar y retirar el aislamiento con un cuchillo pequeño, entonces el ataque químico puede estar ocurriendo. Hay pocas pruebas de diagnóstico que se puedan hacer desde los terminales de máquina que indiquen que está produciendo el problema. Si el problema está en una fase avanzada, la resistencia de aislamiento y los resultados del índice de polarización pueden diagnosticar la anomalía.

El medio más importante para prevenir el deterioro del devanado por este mecanismo es mantener una máquina totalmente cerrada, asegurándose de que las fugas de aceite o grasa no se están produciendo, y que no se utilizan para la limpieza los materiales incorrectos.

- Fugas del agua para refrigeración del estator.

Este problema está asociado a turbinas de agua y vapor con refrigeración directa por agua. En ocasiones se producen fugas de agua dentro de los devanados que pueden provocar cortocircuitos además de corrosión en los metales del devanado. La presencia de agua reduce la resistencia mecánica y eléctrica del aislamiento, lo que supone una mayor probabilidad de que se produzcan fallos.

La principal causa de fugas se debe a deficiencias en la soldadura de los conductos o tubos por los que circula el agua de refrigeración. Es muy difícil determinar con una inspección visual si existe este problema en el devanado, ya que normalmente no hay evidencias en la superficie del devanado.

Para prevenir este tipo de problemas es muy importante seguir las instrucciones de funcionamiento y mantenimiento que nos proporciona el fabricante. Se deberán reemplazar las barras o bobinas que presenten fugas para asegurar el correcto funcionamiento de la máquina. En cualquier otro caso existen otros remedios que presentamos a continuación:

- Adición de productos químicos al agua de refrigeración para sellar la fuga sin tener que reparar la bobina.
- Inyección de epoxy en determinadas fugas para su eliminación.
- Reemplazar barras o conductos que tienen fugas por otros más modernos.

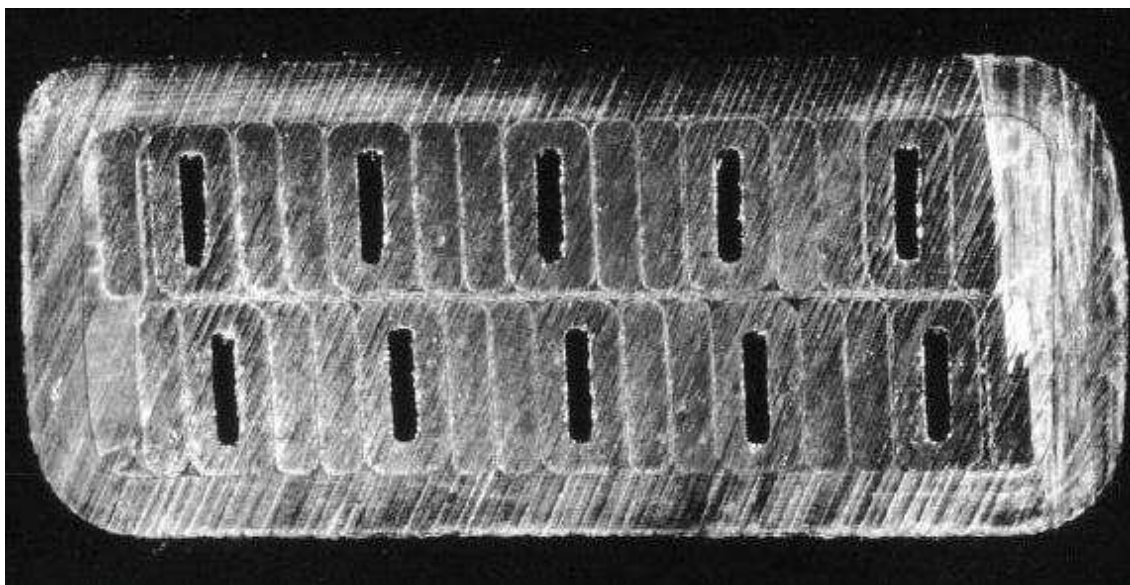


Figura 2.15. Detalle de los conductos de refrigeración directa [Stone, 2004].

- Conexiones eléctricas defectuosas.

En un devanado estático hay gran cantidad de conexiones entre bobinas o barras, las cuales están unidas mediante soldaduras. Si la resistencia de las soldaduras es muy alta, se produce un sobrecalentamiento innecesario que degrada el aislamiento y el material conductor causando fallos.

La causa principal de este deterioro, es la soldadura defectuosa de las uniones, y para evitar este sobrecalentamiento habrá que mejorar la refrigeración en esas zonas de unión o bien reducir la carga de la máquina.

En una inspección visual del devanado, las conexiones que suponen un riesgo de fallo suelen ser evidente porque el aislamiento aparece descolorido (quemado), e incluso se desprende fácilmente. La tendencia en la conductividad del devanado en el tiempo es la mejor manera de detectar las conexiones eléctricas defectuosas. Los fabricantes utilizan a veces la cámara infrarroja para detectar conexiones de alta resistencia en el devanado.

2.4.- Ensayos de Mantenimiento y Aceptación.

Este capítulo describe los principales ensayos que están disponibles para la precalificación por parte del fabricante de los sistemas de aislamiento y la evaluación de la calidad del aislamiento en los nuevos devanados, tanto en la planta de fabricación (aceptación) como en el lugar de funcionamiento (mantenimiento). Se están realizando grandes avances en la tecnología de las pruebas, debido a la evolución de la electrónica y la mejora de los sofisticados ordenadores con software de análisis de datos. Todas estas pruebas están diseñadas para ayudar a dar seguridad de que los devanados en máquinas nuevas y bobinas de recambio nuevas darán un servicio confiable. En los ensayos de mantenimiento, se tratará de diagnosticar posibles deficiencias que pudieran desembocar en un fallo inesperado de la máquina en el futuro.

- Ensayo de Descargas Parciales.

El test de descargas parciales mide directamente los impulsos de corriente derivados de las DP dentro de una bobina energizada a la tensión nominal respecto de tierra. Esta prueba detecta los espacios vacíos en el aislamiento de tierra de los devanados, resultante de una pobre impregnación de la bobina, así como problemas con el recubrimiento semiconductor. Estos ensayos pueden ser on-line u off-line, y se hacen sobre máquinas enteras o como mucho sobre partes de la máquina muy depuradas.

Los circuitos básicos de detección de descargas parciales deben tener una estructura similar a los que observan a continuación. Existen dos tipos de circuito, directo e indirecto.

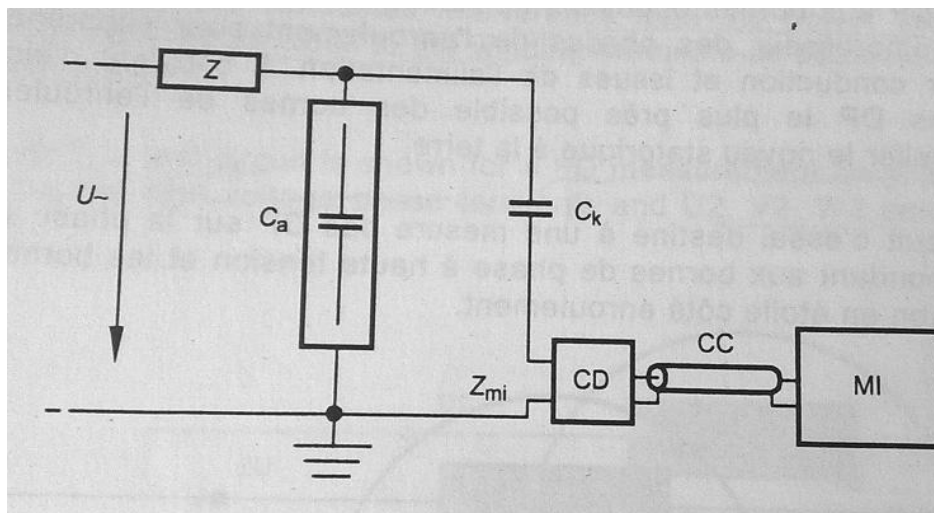


Figura 2.16. Circuito indirecto de detección, impedancia de medida en serie con el condensador de acoplamiento [IEC 60034-27, 2006].

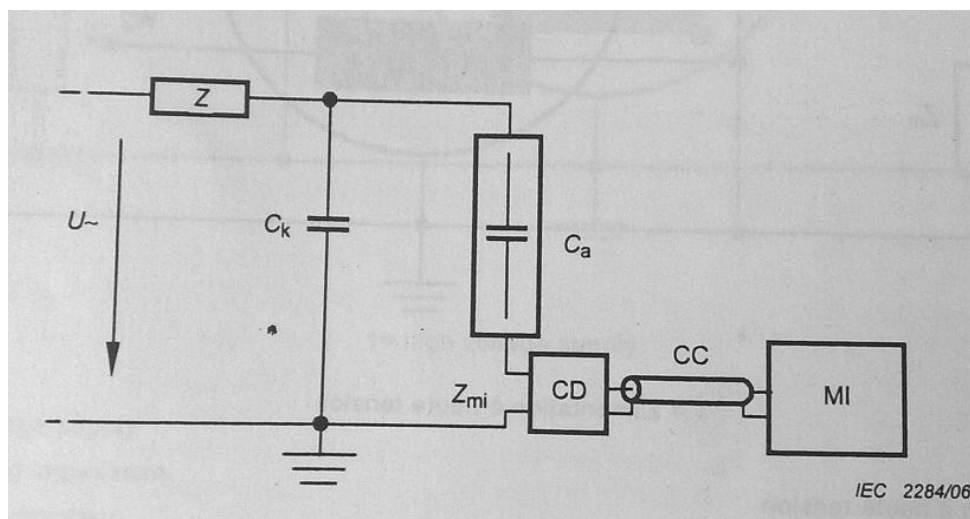


Figura 2.17. Circuito directo de detección, impedancia de medida en serie con el objeto de ensayo [IEC 60034-27, 2006].

Los componentes de los circuitos son los siguientes:

- Un condensador “Ca” que representa nuestro objeto de ensayo.
- Un condensador de acoplamiento, “Ck”.
- Una fuente de alto voltaje “U-”.
- Una impedancia de medida “Zmi”.
- Un cable de conexión “CC”.
- El filtro “Z” que reduce el ruido generado por la fuente de alta tensión.
- Un dispositivo de acoplamiento “CD”.
- Un instrumento de medida “MI”, en nuestro caso se trata de un sistema de adquisición de DPs.

En la prueba de DP, el medio más común de detectar las corrientes de DP es utilizar un condensador de alta tensión conectado a los terminales del estator cuyas capacidades típicas son de 80 pF a 1000 pF. El condensador es una impedancia muy alta para la corriente de 50Hz, mientras que una impedancia muy baja para las corrientes de impulsos de alta frecuencia de DP. El actual pulso DP que pasa por el condensador va a crear un pulso de voltaje en la impedancia de medida, la cual se puede mostrar en un osciloscopio, analizador de espectro de frecuencias, o de otro dispositivo de visualización. Cada DP creará su propio pulso. En general, la magnitud de un determinado pulso de DP es proporcional al tamaño de la vacuola en el que se produjo. En consecuencia, cuanto mayor sea el pulso detectado, más grande es el defecto que causó la descarga.

Antes de comenzar los test de detección de DP, deberemos asegurar que el nivel de ruido es suficientemente pequeño para realizar unas medidas aceptables. El ruido, debido a perturbaciones externas, debe ser clasificado en los instrumentos de medida. La sensibilidad de un equipo de medida de DP está definida por la relación de la energía de las DP y la energía que llega al equipo de medida. Hay dos tipos distintos de ruido, el que se crea en los circuitos eléctricos y que no puede ser eliminado completamente, y el que surge por un comportamiento anormal de los componentes provocado por fuentes externas al circuito y que puede aparecer de forma esporádica o periódica. Además el nivel de ruido se incrementa con la temperatura y la resistencia.

La frecuencia en sistemas de detección de DP determina la cantidad de energía que puede ser detectada de la señal de DP del devanado. Si se utiliza la frecuencia inferior de corte de la red de detección para la medición conseguiremos una mejor sensibilidad pero estaremos expuestos a mayor cantidad de distorsiones debidas al ruido. Si por el contrario utilizamos el rango de mayor frecuencia para medir, obtendremos una menor proporción de DP y seremos menos susceptibles al ruido (Figura 2.18). Para monitorizar máquinas sin carga (ensayos *Off-line*), y conseguir la sensibilidad apropiada se deben utilizar sistemas con una frecuencia inferior de corte menor (por esto, en ensayos de laboratorio, la capacidad de acoplamiento suele ser lo mayor posible). En ensayos con la máquina en servicio, al tener que medir con múltiples fuentes de ruido, conviene emplear redes de detección que filtren a mayor frecuencia, lo que obliga a utilizar condensadores de acoplamiento de menor valor.

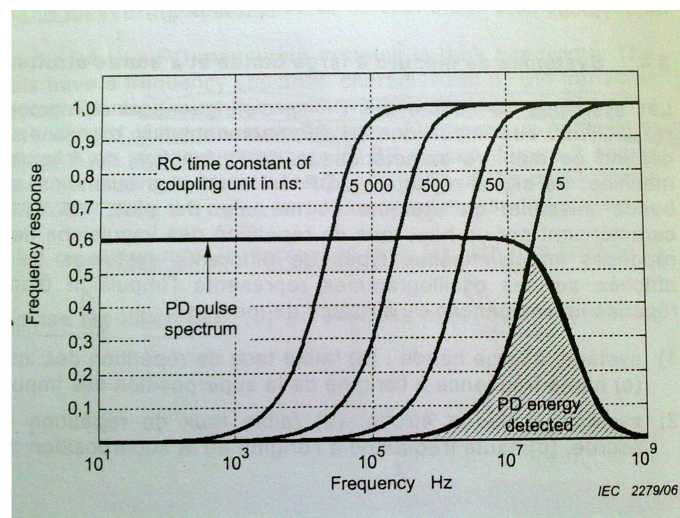


Figura 2.18. Gráfico que relaciona la frecuencia con la energía detectada de las DP [IEC TS 60034-27].

La prueba requiere una fuente de alimentación de AC capaz de suministrar tensión libre de DP de 50 ó 60 Hz variable, por lo menos, hasta la tensión nominal de la máquina bajo prueba. Las DP medidas se toman para cada bobina incrementando la tensión progresivamente, para medir la tensión de inicio de DPs (“Partial Discharge inception voltage”, PDIV) y la tensión de la extinción de DPs (“Partial Discharge extinction voltage”, PDEV). Lo mejor es realizar la prueba de DP en los terminales de la máquina, con una sola fase ensayada y las otras dos fases a tierra (Figura 2.19).

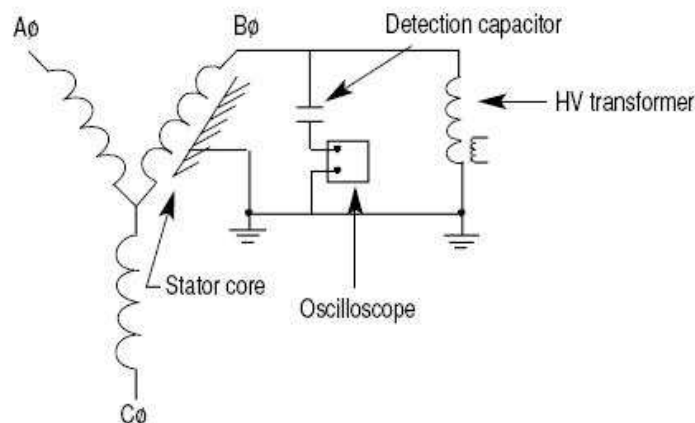


Figura 2.19. Circuito de detección de DP en una fase de un estator en estrella [Stone, 2004].

Dos indicadores muy importantes del deterioro del devanado son el “DIV” (discharge inception voltage) y el “DEV” (discharge extinction voltage), que nos indican la tensión de inicio de descargas y la tensión de extinción de descargas, respectivamente. Una disminución de estos valores nos indica que puede estarse produciendo un deterioro del aislamiento a tierra del devanado.

Se trata de evaluar las condiciones del aislante, y esto se consigue mediante la interpretación de patrones de DP, separando las distintas fuentes de descargas parciales. Observar la tendencia en la actividad de DP y localizar los diferentes fenómenos de DP. Si existe un mecanismo de deterioro que predomina en un devanado, el test de DP nos puede proporcionar la localización aproximada de ese deterioro dentro del aislamiento a tierra, dependiendo de la intensidad, frecuencia y predominio de la polaridad de las descargas.

Como ejemplo de diagnóstico diferenciado dentro de un aislamiento gracias a las DPs, se puede indicar que la polaridad de éstas tiene un papel muy importante:

1) Existe una predominancia de las descargas parciales negativas, cuando son de tipo internas (típicamente, vacuolas cercanas a los conductores, aislamiento de espira).

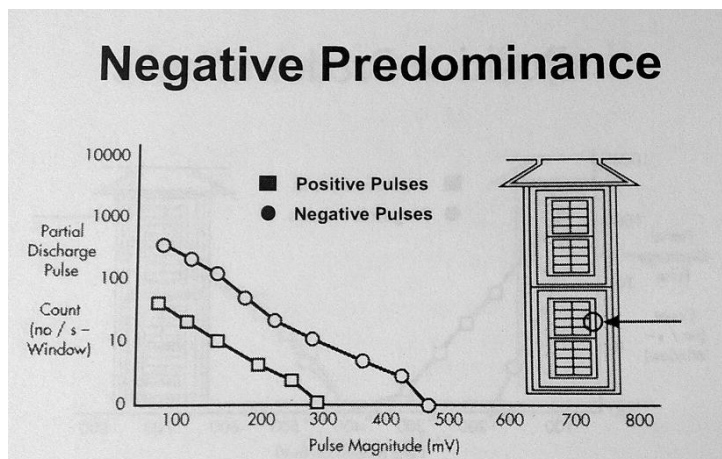


Figura 2.20. Gráfico del nº de DP frente a magnitud de la descarga. Se observa que el número de descargas negativas es superior [Adwel, 2006].

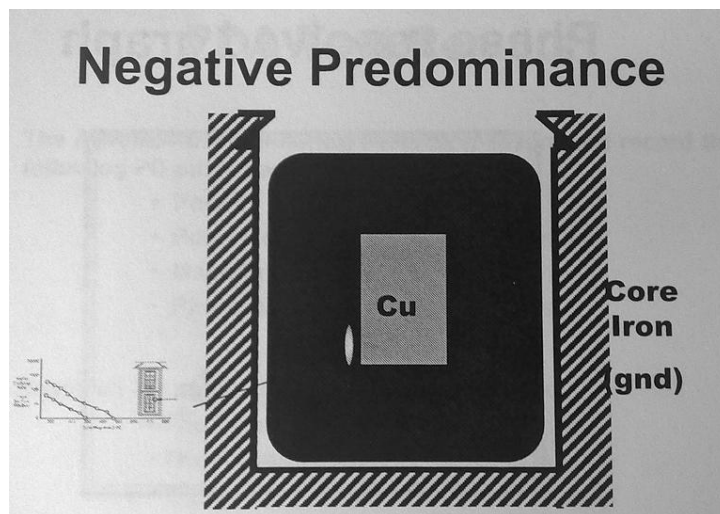


Figura 2.21. Representación de la zona donde se producen las descargas en una ranura del estator [Adwel, 2006].

2) Cuando las descargas son de tipo superficial (por ejemplo, en defectos cercanos a la chapa magnética), predominan las positivas.

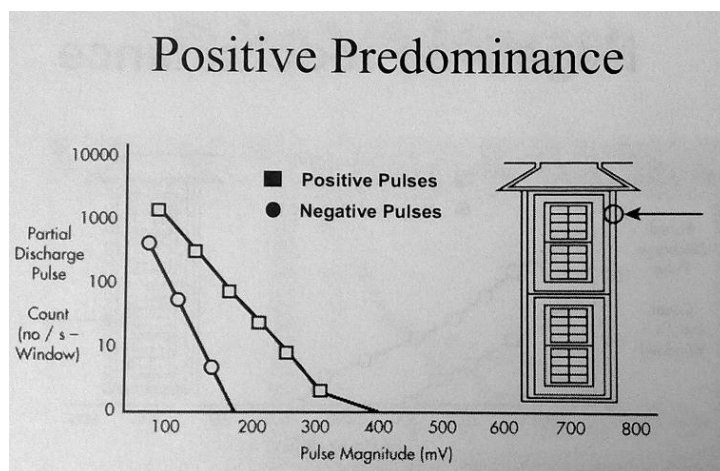


Figura 2.22. Gráfico del nº de DP frente a magnitud de la descarga. Se puede observar que las descargas positivas predominan sobre las negativas [Adwel, 2006].

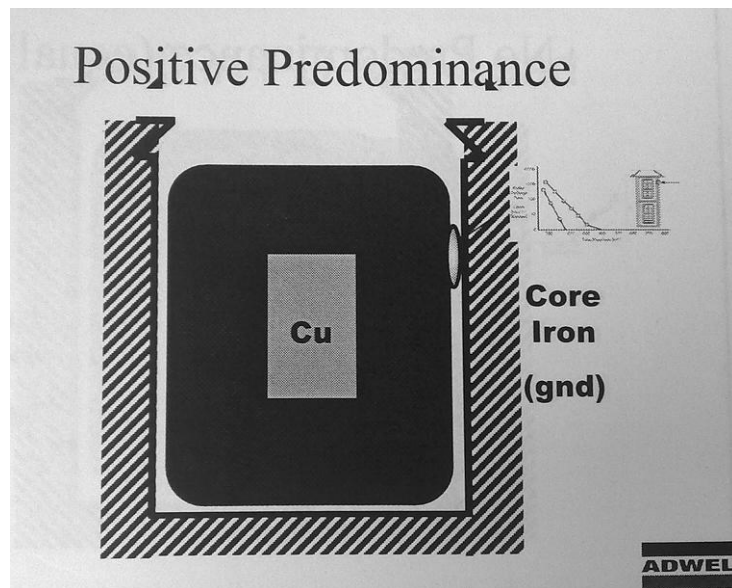


Figura 2.23. Representación de la zona en la ranura donde se producen las DP [Adwel, 2006].

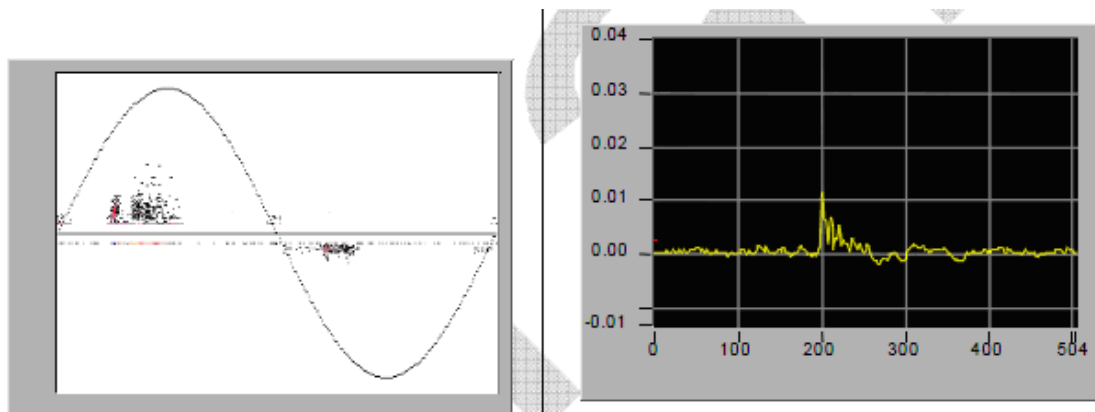


Figura 2.24. Ejemplo de Patrón y Pulso de DP superficial [PDCheck manual 2008].

3) En cambio cuando las descargas parciales se producen en el aislante a tierra principal, no existe predominio en la polaridad de las descargas. En aislantes viejos es común que se produzcan en el interior del aislamiento a tierra en delaminaciones o áreas donde el recubrimiento está perdido o incompleto.

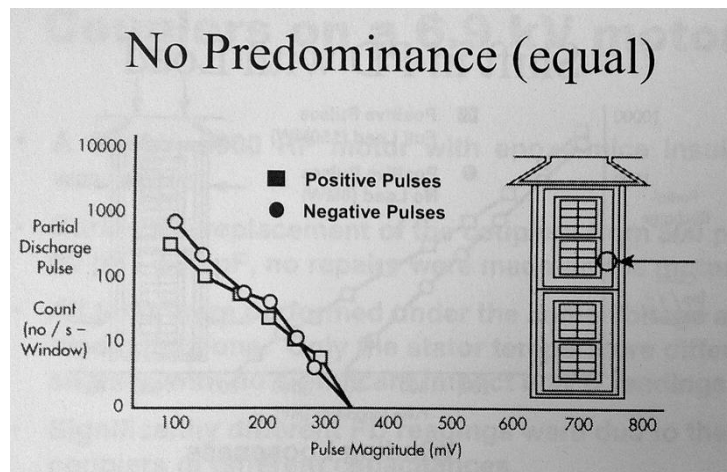


Figura 2.25. Gráfico del nº de DP frente a magnitud de la descarga. La cantidad de descargas es equivalente para distinta polaridad [Adwel, 2006].

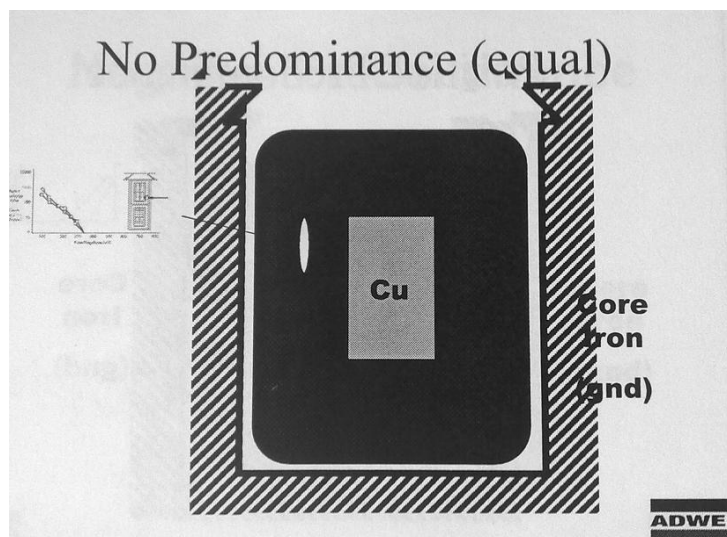


Figura 2.26. Representación de la zona del aislante donde se producirían este tipo de descargas [Adwel, 2006].

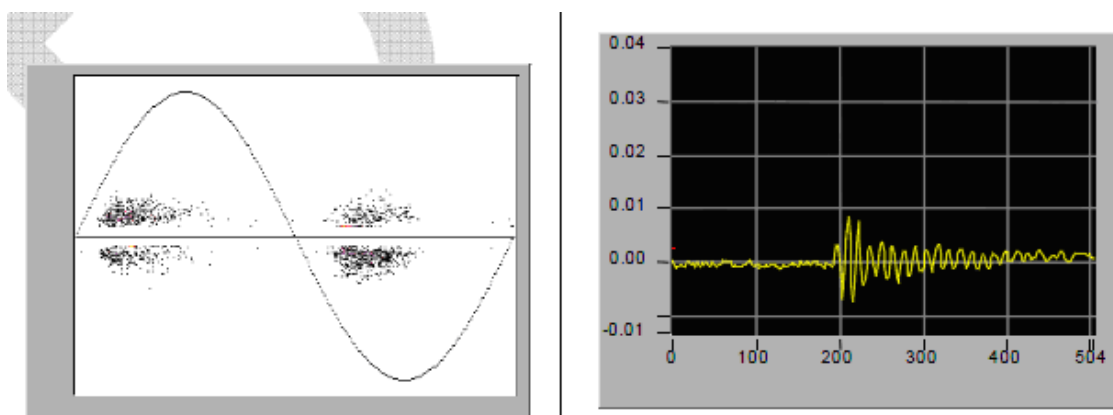


Figura 2.27. Ejemplo de Patrón y Pulso del tipo de descargas que se producen en esta zona del aislamiento [PDCheck manual 2008].

Aún así, es muy difícil estimar el grado de deterioro de una máquina mediante la cantidad de descargas parciales, pero sí se podrá comparar varias máquinas similares, y devanados con el mismo diseño, fabricación o tipo, para sacar conclusiones de la degradación que sufren. Cada máquina es única y es difícil sacar conclusiones con una sola medición, aunque sí se puede concluir qué fase está en mejor estado. Para facilitar la comparación entre distintos test, deberemos utilizar una base de datos de mediciones de DP en una misma máquina. Se recomienda realizar ensayos off-line de la máquina cada 6 meses ó un año, de manera que un incremento significativo de la tasa o magnitud de DPs entre mediciones permite anticipar un fallo inesperado. Esta base de datos deberá incluir un completo informe sobre el comportamiento, operación y mantenimiento de la máquina. La relación entre la magnitud de DP y el riesgo de fallo del aislante está basado en la experiencia de ensayos anteriores o sobre máquinas similares.

A continuación presentamos razones para utilizar la detección de descargas parciales.

- Identificar el origen de los fallos catastróficos.
- Prolongar el tiempo de vida de la máquina.
- Alargar el intervalo de tiempo entre operaciones de mantenimiento.
- Maximizar los ingresos por producción.
- Test simple, seguro y poco costoso.
- Test no destructivo.

Esto hace que máquinas de funcionamiento crítico suelen incorporar la Monitorización continua de DPs en funcionamiento convencional. Estas son las medidas con la máquina en servicio (“On-Line”). Estas medidas permiten tener automatizadas las medidas y establecer una base de datos que permita analizar la tendencia de la actividad de DP con el tiempo de funcionamiento. Además de no requerir paradas programadas de la máquina, las medidas se ajustan más a la realidad, por estar la máquina operando en condiciones cercanas a las nominales. A pesar de su mayor precio (requiere de un equipo de adquisición dedicado), la medida de DPs On-Line ha demostrado ser una técnica eficiente para anticipar fallos en máquinas rotativas.

El uso de una normalización es necesario debido a la influencia del circuito de test y para garantizar que el sistema de medición de DP nos proporciona la suficiente sensibilidad para detectar una magnitud de DP de forma correcta. Además facilita las comparaciones entre ensayos que se realicen sobre objetos con el mismo diseño o especificaciones, siempre y cuando se utilice el mismo sistema de medida, pero aún así no nos da una referencia para comparar en diferentes máquinas.

- *IEEE Std 62.2-2004 IEEE “Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus-Electrical Machinery”. Ensayos de campo.*
- *IEEE Std 1434-2000, “IEEE Trial Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery”. Descripción de ensayos y técnicas utilizables.*
- *ASTM D 1868-81, “Standard Test Method for Detections and Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems”.*
- *IEC 60270 – 2000 – 12 – “Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements”.*

- IEC 60034-27-2006. *“Rotating electrical machines- Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines”*.

- Ensayo de Tensión soportada.

La alta tensión es un importante mecanismo de envejecimiento para bobinados del estator de 3 kV de tensión nominal y superiores. Es bien sabido que el aumento del voltaje en la bobina de aislamiento a tierra reducirá el tiempo hasta fallo si las descargas parciales están presentes. Las pruebas de resistencia a tensión utilizan este fenómeno para identificar los puntos débiles en los aislamientos a tierra utilizados y su modo de aplicación. Algunas bobinas/barras sometidas a esta prueba deben ser desechadas. Esta prueba es potencialmente destructiva para la máquina.

El ensayo de tensión soportada proporciona un importante método para la detección de puntos débiles en las numerosas actividades implicadas incluidas en el diseño y fabricación de bobinas eléctricas. La aplicación coherente de la prueba ayuda a que los proveedores reconozcan los posibles problemas y así evitar importantes costos de rediseño y reorganización. Los clientes se benefician de un mayor nivel de garantía de servicio a largo plazo de las máquinas, así como un número de proveedores disponibles para el abastecimiento competitivo según las necesidades.

Esta prueba está diseñada para comprobar que el aislamiento a tierra del devanado y, en su caso, si la capacidad semiconductora y la calidad de los materiales son adecuados tanto en las propiedades del material como en el método de fabricación. Puede revelar defectos de fabricación, tales como:

- Reducción del grosor de aislamiento en las esquinas de la bobina (debido a una muy alta tensión de la cinta durante la aplicación o faltas de capa de cinta).
- Arrugas en el aislamiento.
- Deficiente aplicación de semiconductores y calidad de materiales.
- Vacuolas (debido a la insuficiente o inadecuada aplicación de resina de unión).

En una prueba de precalificación (ensayo de aceptación), las bobinas o barras están sujetas a un esfuerzo de tensión mucho más alto de lo normal. Para el máximo nivel que se aplica a la prueba de tensión soportada, el estrés de tensión utilizado es de 3,75 a 4,4 veces la tensión nominal fase-tierra.

El estándar IEEE 1043-2000, denominado “Recommended Practice for Voltage Endurance Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Generators,” describe el método de la prueba. La tensión de prueba se aplica entre los conductores de la bobina y el núcleo magnético. Al comienzo de la prueba, esta tensión debe aumentarse gradualmente hasta el valor requerido y debe mantenerse durante un período de tiempo predeterminado, por ejemplo, 250 a 400 horas o hasta que se produce un fallo de la bobina.

Si todas las bobinas o barras pasan la prueba y el examen visual no revela defectos de fabricación o material, entonces el sistema de aislamiento puede ser considerado de buena calidad y de larga vida si se mantiene adecuadamente. La disección de las bobinas que no pasan la prueba a menudo puede resultar en la

identificación de los bienes y mejoras de fabricación necesarias para lograr resultados satisfactorios en el futuro.

- Ensayo de Resistencia del aislamiento.

Este es probablemente el test de diagnóstico más utilizado para devanados de motores y generadores. Se puede aplicar a todas las máquinas y bobinados, con la excepción del motor de inducción de rotor de jaula de ardilla, que no tiene ningún tipo de aislamiento en el rotor. Esta prueba localiza con éxito la contaminación y los problemas que causa en los bobinados. En los sistemas de aislamiento que han estado en servicio, la prueba también puede detectar el deterioro térmico.

La prueba mide la resistencia del aislamiento eléctrico entre los conductores de cobre y el núcleo del estator o rotor. Lo ideal sería que esta resistencia fuera infinita, ya que, el fin del aislamiento es bloquear el flujo de corriente entre el cobre y el núcleo. En la práctica, la resistencia no es infinitamente alta. Por lo general, a menor resistencia de aislamiento, mayor probabilidad de que ocurra un problema con el aislamiento.

En la prueba se aplica una tensión continua relativamente alta entre la bobina de cobre y el estator o el rotor principal (por lo general a través de la estructura de la máquina). Entonces, se mide la corriente que fluye en el circuito. Lo que constituye una lectura "buena" y una lectura "mala" depende de la naturaleza del sistema de aislamiento y los componentes (estator o rotor) que se están probando.

Para realizar esta prueba se utiliza el "índice de polarización" (IP), se trata de la relación entre la resistencia de aislamiento medida a 1 minuto y a 10 minutos después de aplicada la tensión continua de prueba. Durante esos 10 minutos la tensión debe de ser mantenida. Se verá como va cayendo la corriente y por tanto aumentando la resistencia a tierra.

$$IP = R_{1\text{min}}/R_{10\text{ min}} = I_{10\text{ min}}/I_{1\text{min}}$$

El índice de polarización es un valor que nos informa sobre el estado de humedad y limpieza de la máquina. Un valor bajo nos indicará que existe una corriente alta de conducción o de fugas, originada por suciedad y humedad.

Valores del índice de polarización y diagnóstico del aislamiento:

IP<1 estado aislamiento: mal estado

1<=IP<2 estado aislamiento: cuestionable

2<=IP<4 estado aislamiento: bueno

4<=IP estado aislamiento: muy bueno

- Surge test o ensayo de Sobretensión.

Los fabricantes de máquinas y las empresas de rebobinado utilizan este test para comprobar la integridad y calidad del aislamiento de espiras, tanto para devanados aleatorios como devanados ordenados.

El test de sobretensión consiste en la aplicación de un transitorio de tensión relativamente alto entre las espiras. Este examen es potencialmente destructivo, por lo que el aislamiento en ocasiones requiere una reparación, sustitución de la bobina, o un rebobinado. Si el aislamiento de espira falla durante el test, entonces se supone que el estator fracasaría en el servicio, debido a arranques del motor, sobretensiones de IFDs o transitorios causados por fallas del sistema eléctrico. Si el aislamiento no se perfora, entonces la suposición es que el aislamiento de espira resistirá a cualquier aumento probable de la tensión en el servicio durante los próximos años. Por lo que no sería necesaria una reparación de la máquina.

El estándar *IEEE 522* ofrece la mejor descripción del test de sobretensión de aceptación y mantenimiento para devanados ordenados del estator. Como una prueba de aceptación, se recomienda que la sobretensión tenga un tiempo de subida de 100 ns y una magnitud máxima de 3,5 por unidad, donde el 1 por unidad es la cresta de la tensión nominal fase-tierra. Para una prueba de mantenimiento (el devanado ha estado en servicio) el aumento de tiempo de subida debe ser el mismo, pero sólo llega a 2,6 por unidad.

La principal dificultad de la prueba de sobretensión es determinar cuándo se ha producido una perforación en el aislamiento, debido a que no es válido el método del cálculo de la resistencia de la bobina como en otros test. El método para detectar si existen perforaciones consiste en observar si se producen cambios en la frecuencia de resonancia causado por un cortocircuito en una espira. Esta resonancia se produce porque el circuito que aplica la tensión tiene un condensador. Si se produce una perforación del aislamiento, la inductancia de la bobina disminuirá y esto causará un aumento de la frecuencia de resonancia. Es más fácil detectar un fallo de aislamiento en bobinas individuales, ya que el cortocircuito de una vuelta tendrá un impacto mucho mayor en la inductancia total de una bobina, por lo tanto cambiando drásticamente la forma de onda.

Cuando se aprecian cambios significativos en la forma de onda en el osciloscopio, es probable que el aislamiento de espiras haya sido perforado. Si el aislamiento falla en un devanado aleatorio, es bastante posible observar el lugar del fallo, lo que será una ventaja a la hora de repararlo. Además de comparar resultados de formas de onda para ensayos realizados durante toda la vida de la máquina, ante un cortocircuito en una fase, éstas cambiarán en los tres impulsos aplicados al estator de la máquina.

- Monitorización de la temperatura.

El deterioro térmico es una de las principales causas de fracaso en las máquinas de refrigeración por aire, por ello la monitorización de la temperatura se convierte en una forma de mantenimiento muy importante. La tasa de deterioro del aislamiento aumenta con la temperatura de operación, lo que provoca una menor duración de éste. Por lo tanto, no es de extrañar que prácticamente todos los bobinados del estator, por encima de unos pocos cientos de kW, están equipados con sensores integrados de temperatura.

En la mayoría de los casos, estos sensores son utilizados durante las pruebas de aceptación inicial de la máquina y, una vez funcionando, se conectan a alarmas para advertir de variaciones muy altas de temperatura. Sin embargo, se pueden diagnosticar los procesos que están produciendo un mal funcionamiento mediante el control y la tendencia de la temperatura. El control de la temperatura es probablemente el sistema más rentable y más fácil para llevar a cabo el seguimiento de la máquina.

Los devanados estatóricos de máquinas pequeñas rara vez tienen sensores de temperatura dentro de él. La mayoría suele tener un interruptor de protección térmica, que apaga la máquina si opera por encima de una temperatura específica. Sin embargo, modernos devanados estatóricos de grandes motores y generadores suelen tener varios sensores que monitorizan la temperatura continuamente (On-line). Esos sensores miden la temperatura en puntos específicos:

- Integrado en la bobina del estator. En las máquinas de devanado aleatorio se insertan entre las bobinas. En las máquinas de devanado ordenado, se encuentran entre las bobinas superior e inferior de una ranura (Figura 2.28). En estos lugares, el sensor es más sensible a la temperatura de los conductores, en vez de la temperatura del núcleo del estator o la temperatura del aire de refrigeración.

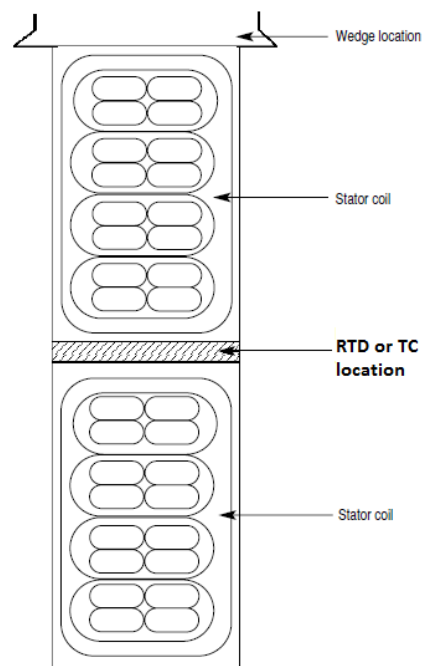


Figura 2.28. Localización de sensores RTD o TC en una ranura de un devanado estatórico [Stone, 2004].

- Máquinas con refrigeración por agua o canales de gas. Los sensores se encuentran en contacto directo con el agua o bobinados del estator refrigerado por hidrógeno, en canales de agua de refrigeración y en el final del estator, donde ha pasado el agua a través de la barra del estator. Del mismo modo, los sensores se colocan cerca del conducto de salida del gas hidrógeno.

Para medir la temperatura en este tipo de máquinas se emplean dos tipos de sensores principalmente, el más común “*RTD*” (detector de temperatura resistivo) y el termopar “*TC*”. Aunque últimamente está aumentado el uso de cámaras infrarrojas que detectan la temperatura al igual que los sensores, pero además nos indican la ubicación donde existe un mayor nivel de temperatura.

En el pasado, una máquina equipada con sensores de temperatura solía tener uno o dos de ellos conectados a una alarma, para advertir cuando las se produjeran altas temperaturas. Aunque de forma periódica se registraran las temperaturas, rara vez se usaba esta información para propósitos de diagnóstico. Más adelante los sistemas de adquisición de datos por ordenador facilitaron la monitorización directa y continua de la temperatura. Estos datos pueden ser continuamente archivados en una base de datos y se almacenan junto con la temperatura ambiente, tensión, corriente, y otros datos de funcionamiento. Esto permite observar en todo momento la tendencia de la temperatura, teniendo un control sobre total sobre la máquina y así poder predecir un posible fallo o planificar el mantenimiento [Stone, 2004].

La ventaja clave de este sistema es su bajo coste, pese a tener un control total del estado de la máquina en todo momento.

2.5.- Test de Envejecimiento.

Además de los ensayos de mantenimiento y aceptación existen otros tipos de ensayos, llamados test de envejecimiento, que como su nombre indica consisten en realizar test sobre partes específicas de las máquinas con el fin de observar su resistencia al envejecimiento.

Con objeto de predecir el comportamiento de los sistemas de aislamiento y elegir el mejor diseño para los mismos, los fabricantes de Maquinaria Eléctrica y diseñadores de aislamientos emplean ensayos de envejecimiento acelerado. Éstos consisten en someter a un determinado tipo de aislante a un funcionamiento superior a lo normal con el fin de acelerar su deterioro mediante temperatura, tensión, corriente, esfuerzo mecánico, etc. y así analizar su comportamiento. El modelo fallará mucho antes de lo que lo haría en condiciones normales, y partir de ahí se analizarán los resultados para estimar su vida útil. Es muy importante conseguir estandarizar este tipo de test para poder comparar diferentes materiales y sacar conclusiones sobre su comportamiento.

- Test de Resistencia al envejecimiento Térmico.

Las pruebas de envejecimiento térmico para materiales utilizan niveles extremos que se eligen arbitrariamente, y que pueden no ser adecuados para aplicaciones particulares. Generalmente se ejecutan hasta que se obtienen fallas eléctricas durante las exposiciones periódicas de tensión elevada.

Los materiales aislantes eléctricos son evaluados térmicamente por la prueba para establecer una relación entre el tiempo de envejecimiento y la temperatura de prueba. Estos ensayos son importantes para el desarrollo de nuevos materiales aislantes, ya que a través de ellos se consigue determinar la tasa de envejecimiento de cada uno, y formando combinaciones podremos desarrollar aislantes enfocados a aplicaciones particulares.

Los comités técnicos pueden elaborar normas para determinados tipos de máquinas rotativas en las que se establecen los procedimientos de prueba para que se establezca la clase de temperatura de sus sistemas de aislamiento. Para estas pruebas se requerirá un sistema de aislamiento de referencia, definido como un sistema de aislamiento eléctrico asignado a una calificación de temperatura del sistema, basado en la experiencia o prueba, que se utiliza para calificar a un sistema de aislamiento eléctrico nuevo o modificado.

Para la realización de este test se utilizan unas bobinas especiales que facilitan la realización de este tipo de ensayos. La prueba estándar recomienda que se utilicen cuatro temperaturas distintas que se logra colocando las muestras en un horno grande, la circulación de agua caliente o aceite en los conductores huecos (si es posible), o mediante la aplicación de las placas de calefacción en el exterior de las muestras. Por lo general, las temperaturas se encuentran en el rango de 120 ° C a 220 ° C, y para cada temperatura de ensayo se utiliza un grupo diferente de bobinas. El tiempo de exposición al estrés por temperatura, normalmente días, disminuirá conforme aumente la temperatura empleada. Después de cada ciclo de envejecimiento térmico, las bobinas

son sometidas a la exposición de estrés mecánico, seguido por exposición a la humedad, y terminando con la exposición a un nivel de tensión nominal. Dependiendo de los resultados obtenidos, las diferentes muestras analizadas se clasifican en “clases” que serán destinadas a sus correspondientes servicios.

En la práctica, la norma básica para todos los materiales de aislamiento y pruebas de los sistemas de aislamiento es la última versión de la norma ANSI / IEEE *Standard No. 1-Práctica recomendada para los límites de temperatura en la Clasificación de Material Eléctrico y para la Evaluación de Aislamientos Eléctricos*.

A continuación presentamos varias normas específicas relacionadas (Publicaciones IEC):

- *N ° 60610-Principales aspectos de la evaluación funcional de los sistemas de aislamiento eléctrico: Envejecimiento de los mecanismos y procedimientos diagnósticos.*
- *N ° 60611-Guía para la Elaboración de procedimientos de ensayo para evaluar la resistencia térmica de los sistemas de aislamiento eléctrico.*

- Test de Resistencia al envejecimiento Eléctrico.

Desde el punto de vista básico, cada material de aislamiento tiene una rigidez dieléctrica a corto plazo. Es decir, si la tensión aumenta rápidamente a través de un material de aislamiento, en algún momento habrá tensión suficiente para perforar el aislamiento. La rigidez dieléctrica es la tensión de ruptura dividida por el espesor del aislamiento.

Para intentar predecir el comportamiento de los sistemas de aislamiento envejecidos por tensión aplicada, se están desarrollando test de resistencia eléctrica como el test Off-Line de Descargas Parciales. Es evidente que trata de aplicar una tensión, superior a la que se usaría en condiciones normales, sobre un sistema de aislamiento y medir el tiempo hasta que se produce el fallo.

Aunque existen algunos métodos de prueba de resistencia eléctrica que han sido normalizados, el número y la generalización de estas normas son mucho menores que para las pruebas de resistencia térmica. Estos test normalmente sólo se aplican a los sistemas de aislamiento del estator, ya que por lo general sólo se deteriora gradualmente el aislamiento estatórico. Puesto que el propósito principal de aislamiento eléctrico es evitar cortocircuitos entre los conductores a diferentes potenciales, no es sorprendente que haya medios para determinar la capacidad de un aislamiento para soportar la tensión. Por lo general, las pruebas de resistencia eléctrica para las máquinas rotativas sólo se aplican a los sistemas de aislamiento, y no a los materiales.

La mayoría de los ensayos de resistencia eléctrica para bobinados del estator con una tensión nominal de 1 kV o más son métodos de ensayo propietarios que son únicos para cada fabricante de bobinas del estator. Los fabricantes de máquinas determinan el espesor del aislamiento de tierra sobre la base de los métodos de ensayo de desarrollo propio. Al realizar la prueba en una amplia gama de diseños de sistema de aislamiento, el fabricante puede establecer qué diseño da un resultado satisfactorio obtenido en las

condiciones aceleradas por el mínimo coste. En este sentido los ensayos de envejecimiento acelerado por DPs son una técnica de gran utilidad para elegir componentes y materiales aislantes.

La mayoría de los procedimientos de ensayo utilizan muestras relativamente pequeñas que simulan la barra o rollo en la ranura. Normalmente, las muestras pueden ser de 0,5 m hasta 1 m de longitud para simular la sección de la ranura de una bobina o barra, aunque algunos fabricantes utilizan a veces las bobinas o barras completas. Las muestras podrán tener un grosor de aislamiento más delgado de lo normal, lo que permite realizar las pruebas en tensiones inferiores. Siempre hay una capa semiconductor aplicada para mejorar el contacto con el plano de tierra, debido a que el estrés de la prueba es alto. Mientras que algunos fabricantes utilizan frecuencias de 50/60 Hz en la alimentación de este tipo de ensayos, otros utilizan frecuencias de 400 a 5000 Hz, lo que permite acelerar el envejecimiento del material, ya que el número de DP por segundo es proporcional a la frecuencia y así conseguiremos deteriorar el material en menos tiempo. Todo esto provoca que sea muy difícil realizar comparaciones entre aislantes de distintos fabricantes.

La única norma detallada, como procedimiento de ensayo de resistencia al envejecimiento por tensión que se aplica ampliamente es la norma *IEEE 1043 – “Detailed voltage endurance test procedure for form-wound bars or coils”*.

- Test de Ciclaje Térmico.

El ciclaje térmico ocurre cuando en un motor o generador se producen cambios de carga rápidamente, haciendo que la temperatura del conductor cambie rápidamente entre un nivel bajo y alto y viceversa. A medida que la temperatura del conductor sube y baja, los conductores se expanden y contraen por el coeficiente de expansión térmica, lo que poco a poco fatiga el aislamiento pudiendo romperlo o desgastarlo.

Estas pruebas son normalmente destinadas a ser utilizadas en bobinas de gran tamaño o barras. Las pruebas son más aplicables a las bobinas o barras de estatores en el que la carga está cambiando rápidamente, por lo general hidrogenadores, generadores de bombas de almacenamiento, o generadores de turbina de gas. Los motores también experimentan cambios rápidos de carga, pero debido a la longitud del estator principal (más corta en la mayoría de los motores) el envejecimiento de aislamiento es menos probable.

El ciclo térmico se consigue mediante la circulación de corriente continua o corriente alterna a través de cada barra o bobina, suficiente para elevar la temperatura del cobre a la clase de temperatura para el aislamiento térmico. La temperatura se eleva al límite superior en unos 45 minutos. Cuando se llega al límite de altas temperaturas, la corriente se apaga y el aire frío es soplado sobre la bobina / barra para reducir la temperatura. Esta oscilación de menor a mayor temperatura y posterior enfriamiento hasta una temperatura deseada constituye un ciclo térmico. El producto se prueba hasta que se han completado 500 ciclos térmicos. Por lo menos 4 barras (o 2 bobinas) son necesarias para establecer una tendencia clara. La prueba es destructiva (las bobinas/barras no se puede instalar en un estator después de someterse a la prueba). La prueba es una de las más caras de todas las pruebas de envejecimiento, y sólo se utiliza

cuando así lo exija la aplicación misma. Mientras que el ciclo térmico se está produciendo, no se aplica alta tensión a través del aislamiento, pero una vez terminado el ensayo, se realizan otras pruebas para diagnosticar el grado de deterioro que se ha producido en las barras, las más comunes son las de tensión soportada, ensayos impulso, resistencia de aislamiento y recientemente, el test de DP.

- Test de envejecimiento Multifactorial

Para multiplicar razonablemente la probabilidad de fracaso en los procesos de una prueba de envejecimiento acelerado, se debe aplicar más de un factor al mismo tiempo. Un envejecimiento multifactorial acelerado es aquel en el que dos o más factores de manera simultánea o secuencial se aplican con mayores niveles de esfuerzo aplicado de lo que ocurriría en servicio normal.

En la práctica, debido a su complejidad y coste, las pruebas de envejecimiento multifactorial no se utilizan habitualmente para simular un fallo en el devanado del rotor y el estator. No existen procedimientos específicos de ensayo normalizados. Lo que se ha normalizado, son los procedimientos generales que deben ser empleados en una prueba de envejecimiento multifactorial en los sistemas de aislamiento.

- Test Off-line de Descargas Parciales (con envejecimiento).

El test de envejecimiento de Descargas Parciales es un ensayo destructivo, el cual, hace unos años no tenía la repercusión que está adquiriendo en la actualidad. Su uso quedaba excluido a los fabricantes de máquinas y se está extendiendo a los fabricantes de componentes de las máquinas. Básicamente se trata de un test de Resistencia al envejecimiento Eléctrico (comentado con anterioridad), en el que continuamente se adquieren datos de las DP que se producen en el material o elemento de ensayo, para una vez finalizado el ensayo analizar esos datos y sacar conclusiones del comportamiento o validez de la muestra.

El procedimiento de ensayo es el mismo que en el Test de Descargas Parciales para mantenimiento y aceptación (sección 2.4), salvo en la tensión aplicada que debe ser superior a la nominal para aumentar el estrés eléctrico. Para la realización del test se utilizan los mismos circuitos que en mantenimiento y aceptación. Se trata de un test “Off-line” debido a que no actúa sobre máquinas completas, se aplica sobre partes de máquinas incluso sin depurar y materiales aislantes. Al ser un ensayo destructivo, las muestras de material aislante o partes de máquinas quedarán inservibles, ya que se mantiene hasta que se produce el fallo, de ahí también la causa de no emplear máquinas completas.

Mediante este test se comprueba la resistencia al envejecimiento por DP de hilos de cobre, aceite aislante, cables de alta tensión, láminas con aislamiento de ranura, muestras de barnices sometidos a procesos VPI, etc.

Además, para realizar estos ensayos con el fin de ajustarse a la realidad, muchas veces se ejecutan simultáneamente con mecanismos de ruptura que pueden aparecer

durante el funcionamiento normal. Esos mecanismos de ruptura pueden ser: temperatura, contaminación, humedad, corrientes variables (ciclaje térmico), vibraciones...etc. Todo esto con el fin de sacar conclusiones e información acerca del comportamiento que tendrá ese objeto o material bajo esas condiciones, y cuando esté cerca del fin de su vida útil.

En este proyecto se ha utilizado este tipo de ensayo, tomando como muestra hilo de cobre de tres tipos distintos de fabricante. Se ha realizado el ensayo hasta el final de la vida útil de cada muestra, a la vez que se monitorizaban las DP y adquirían los datos correspondientes. La información recogida es muy valiosa a la hora de analizar los datos recogidos comparándolos con el comportamiento que ha tenido cada espécimen. De esta manera intentamos demostrar la relación de algunos parámetros con el grado de deterioro que sufre la muestra durante el ensayo.

2.6.- Parámetros estadísticos que informan el grado de deterioro.

Para analizar los datos obtenidos durante el test de DP, se utilizan una serie de parámetros estadísticos que proporcionan una información importante acerca del grado de deterioro del aislamiento y son los que observamos y analizamos principalmente en este proyecto. En otro capítulo de este proyecto se realiza un análisis de los propios parámetros, a partir de datos de ensayos de DP adquiridos mediante monitorización, para demostrar si estos parámetros informan realmente del grado de deterioro. A continuación se detallan las variables:

- NQN

Normalized Quantity Number. Es el área normalizada debajo de una línea que representa el número de pulsos frente a magnitud de las descargas, donde el número de pulsos está representado mediante escala logarítmica y la escala de la magnitud de las descargas está representada de forma lineal. Para más facilidad a la hora de saber las condiciones en las que se encuentra el devanado, las curvas de análisis de DP son resumidas en un número. A partir del *NQN* se puede llegar a saber las condiciones del aislante y la probabilidad del éxito en la reparación si se realiza en ese momento. Tanto las DP negativas y las positivas son consideradas en el cálculo del *NQN*. Para calcular el *NQN* se utiliza la siguiente fórmula:

$$NQN = \frac{FS}{G \times N} \times \left[\frac{\log_{10} P_1}{2} + \sum_{i=2}^{N-1} \log_{10} P_i + \frac{\log_{10} P_N}{2} \right]$$

Donde:

P: número de pulsos por segundo.

N: número de escalas de magnitud.

G: ganancia del detector de descargas parciales (aritmética).

FS: escala máxima de magnitud en milivoltios con ganancia unitaria.

- Beta (β)

La variable de forma β es una medida de la variabilidad de las magnitudes de DP. Un valor pequeño de β ($\beta \ll 2$) se asocia a una alta variabilidad, y existirá una gran diferencia entre la mínima y la máxima magnitud de DP detectada en el ensayo. Puede depender o no del nivel de tensión aplicada, [Stone, 2004].

- Alfa (α)

El parámetro de escala α es la magnitud de descarga que han alcanzado el 63.2% de los pulsos (análogo al significado de media de la distribución normal) y siempre es positivo.

- Qmax 95%

La variable *Qmax 95%* nos informa de la magnitud máxima del 95% de las descargas que se producen durante el test de DP.

Algunos de los parámetros anteriores son estimados a partir de una distribución de Weibull, por lo que procedemos a su explicación.

La distribución Weibull es una distribución de probabilidad continua y recibe su nombre del investigador sueco que la desarrolló, Waloddi Weibull. Se caracteriza por considerar la variable *magnitud de descarga* (q), que se utiliza por su gran flexibilidad, y por la capacidad de adaptarse a una gran variedad de funciones de fiabilidad de dispositivos o sistemas. Admite modelar de forma fiable una probabilidad de tiempo hasta fallo o probabilidad de una cierta magnitud de descarga, a partir de un conjunto de datos empíricos. Sin embargo, este procedimiento sólo es válido si los pulsos de DP que pertenecen a diversos fenómenos de DP tienen distribuciones de la altura y/o fase que no se solapen totalmente.

Queda demostrado que la distribución de la altura de pulsos de las DP que pertenecen a una única fuente se puede ajustar bien a una distribución de Weibull de dos parámetros. Se trata de una distribución acumulativa $F(q)$ que define la probabilidad de que una descarga tenga, por ejemplo, una magnitud menor o igual a q [Stone, 1993].

$$F(q) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{q}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad q > 0$$

q : variable aleatoria, en este caso *magnitud de descarga*.

α : parámetro estadístico de escala.

β : parámetro de forma de la distribución.

Siguiendo esta función la probabilidad de que existan descargas de magnitud menor o igual que ∞ es del 100%; es decir $F(\infty) = 1$. Del mismo modo $F(0) = 0$. Esta distribución de probabilidad tiene, por tanto, un carácter acumulativo. Los parámetros de forma y escala α y β son estimados generalmente con el método de máxima probabilidad, calculando las estimaciones con métodos iterativos.

3.- Descripción del Software de Monitorización de Techimp Systems S.r.l.

En este capítulo se van a describir las funcionalidades del Software de Monitorización de DP de la compañía TechImp Sytems S.r.l. que ha sido utilizado para las medidas presentadas en el capítulo siguiente. En primer lugar se describirá la primera versión desarrollada para su uso con el equipo *PDBase*. Posteriormente se explicará el funcionamiento y prestaciones de la opción de Monitorización del Software *PDC Control* para el equipo *PDCheck*, mejora del equipo *PDBase*.

El equipo *PDBase* es un sistema de adquisición de DP que es controlado de forma remota a través de un PC. Como podemos observar a continuación (Figura 3.1), presenta múltiples conexiones; 3 canales de entrada de datos de la adquisición que se utilizan en el caso de analizar una máquina trifásica, una conexión “*Rx/Tx*” para comunicación con el PC (recepción de información y transmisión de datos de las monitorizaciones a través de fibra óptica), un canal de sincronización para la correcta adquisición de los datos, una conexión a tierra y su conexión para la alimentación del equipo.

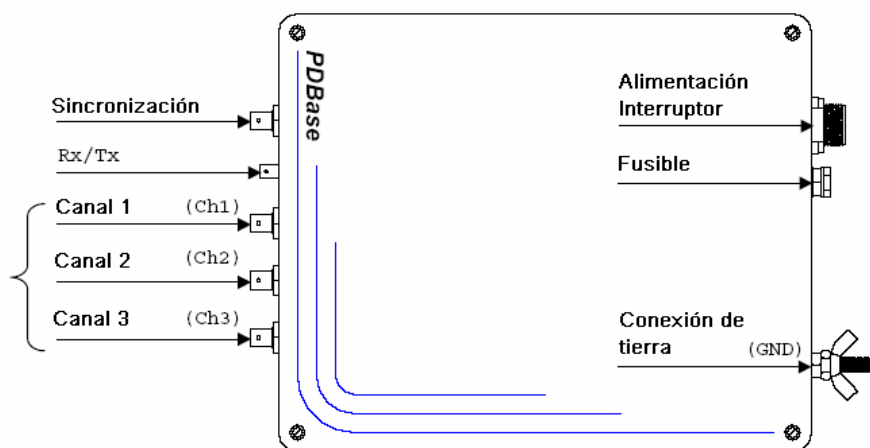


Figura 3.1. Equipo *PDBase* [Docavo, 2008].

Este equipo permite la conexión con el PC de dos modos. Un modo *local* cuando existe una posibilidad de conexión directa con el equipo (Figura 3.2), que en nuestro caso utiliza fibra óptica hasta un *media converter* y se conecta al PC mediante un cable que transforma la salida *Rs232* a USB. Un modo *remoto* cuando el *PDBase* se encuentra alejado de nuestra posición (Figura 3.3), que nos permite conectarnos a él a través de una red de datos (LAN, Internet...).

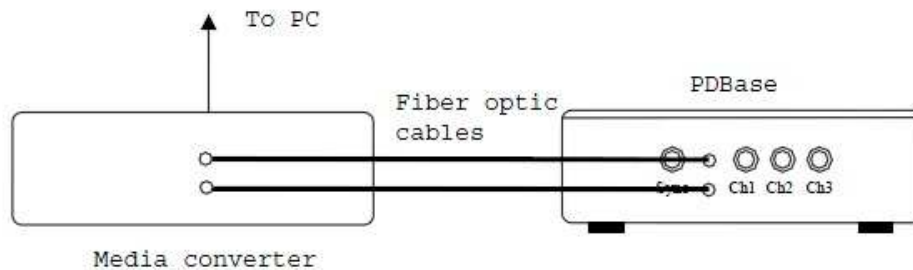


Figura 3.2. Representación de una conexión directa del PDBase al PC [PDBase Manual, 2005].

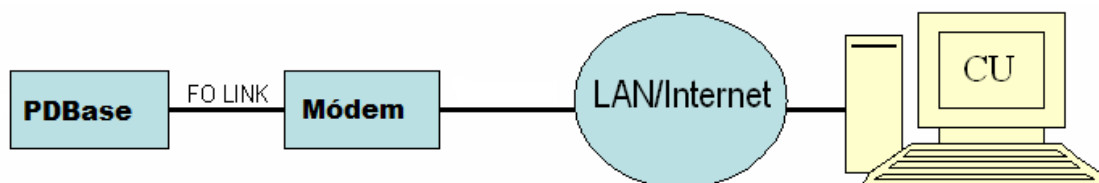


Figura 3.3. Representación de una conexión a través de una red de datos [PDBase Manual, 2005].

Aparte del software *PDMonitor* descrito en este trabajo, *PDBase* utiliza otras aplicaciones como *PDAcquisition* para la adquisición de datos, *PDProcessing* a la hora de analizar exhaustivamente los ficheros registrados y *PDViewer* para visualizar ágilmente los patrones adquiridos antes de pasar a un análisis en profundidad. Todas estas aplicaciones han sido programadas en Labview por TechImp Systems S.r.l. y los detalles de la mismas pueden ser revisados en el trabajo [Docavo, 2008].

3.1.- Software *PDMonitor*.

En rasgos generales el software *PDMonitor* se utiliza para la monitorización de DP en un sistema de aislamiento con el equipo *PDBase* durante el tiempo que consideremos oportuno y con el intervalo de tiempo entre medidas que necesitemos. Podemos programar el equipo según nuestras necesidades, y dejarlo monitorizando una máquina determinada sin necesidad de encontrarse en el lugar o tener un técnico realizando las medidas manualmente, con el consiguiente ahorro de tiempo y dinero para las empresas.

El software contiene la aplicación *Monitoring setup*, que es donde configuramos todos los parámetros del equipo de medida para su correcto funcionamiento y además los tiempos y fechas para la monitorización. Aparte del *Monitoring setup*, el software consta de las aplicaciones *Client PCE*, que controla el estado de la monitorización y *Resume Viewer* que muestra los resultados de la adquisición, y que más adelante procederemos a su explicación detallada.

3.1.1.- Aplicación *Monitoring setup*.

Comenzamos abriendo la aplicación *Monitoring Setup* y aparecerán las siguientes ventanas (Figuras 3.4 y 3.5), en las que se debe seleccionar el tipo de conexión obtenida con el *PDBase*, *modo local* en el caso de que el equipo se encuentre en el laboratorio y exista una conexión directa o *modo remoto* en el caso de que haya que acceder a él a través de una red de comunicaciones, debido a que se encuentre en otro lugar (como ya hemos comentado antes) lejano a la visualización. En nuestro caso el equipo se encuentra en el laboratorio por lo que seleccionamos el modo local.

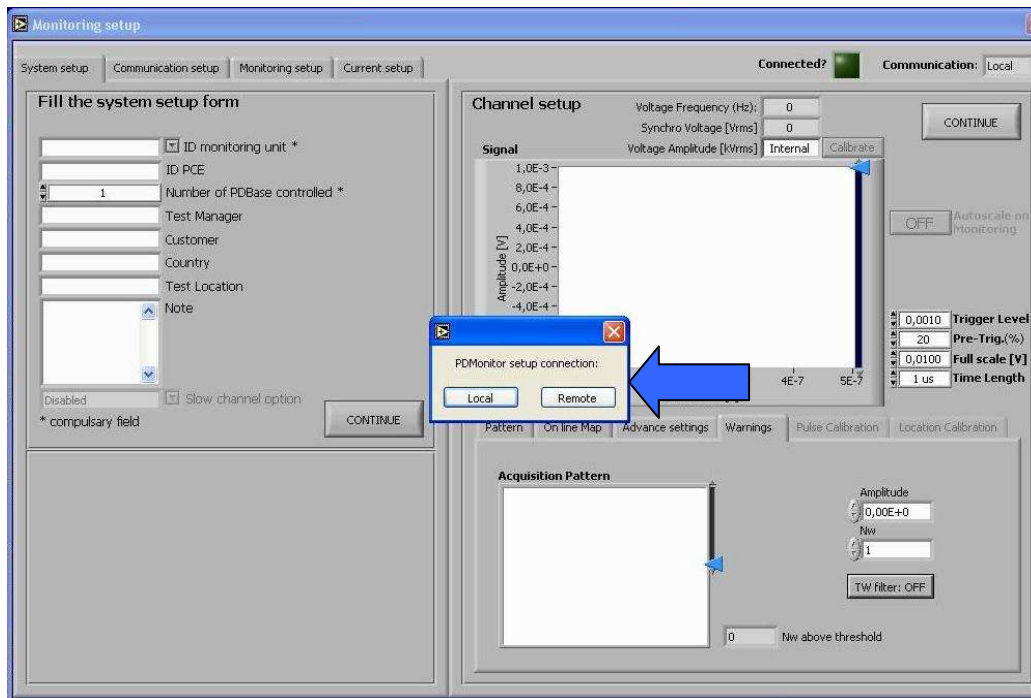


Figura 3.4. Captura de pantalla de *Monitoring Setup*.

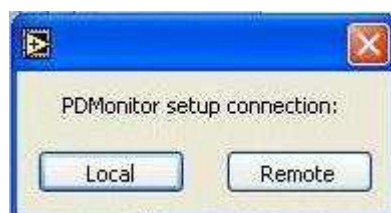


Figura 3.5. Detalle de la pantalla anterior.

Para continuar configurando la aplicación, se debe introducir en el programa los datos del equipo de medida con el que trabajamos (Figura 3.6). Facilitamos la *ID* de la unidad de monitorización que vamos a utilizar y el número de equipos *PDBase* que controlamos (la conexión a distintos equipos *PDBase* es especialmente importante en aplicaciones de Monitorización remota), además de información del usuario para tener los datos más organizados y poder diferenciar en cada momento los ensayos de cada técnico y cliente (*Customer*). Una vez rellenado esto se continua con la puesta en marcha (“*Continue*”).

Monitoring setup

Fill the system setup form

1 ID monitoring unit *

ID PCE

1 Number of PDBase controlled *

Angel Test Manager

LINEALT Customer

Spain Country

Test Location

Note

Disabled Slow channel option

* compulsory field

CONTINUE

Figura 3.6. Detalle de la pestaña "System setup".

Como podemos observar, en la siguiente pantalla requiere que le proporcionemos dos datos importantes: el nombre del instrumento *PDBase* sobre el que se medirán DPs y la dirección del *PDBase*, es decir, la dirección del puerto serie a la que esta conectado el aparato en el ordenador; si ponemos mal esta dirección el ordenador no podrá comunicarse con el *PDBase* y no funcionará la monitorización (Figura 3.7). Una vez hecho esto pulsamos el botón continuar para seguir con la configuración.

Monitoring setup

Fill the system setup form

1 ID monitoring unit *

ID PCE

1 Number of PDBase controlled *

Angel Test Manager

LINEALT Customer

Spain Country

Test Location

Note

Disabled Slow channel option

* compulsory field

CONTINUE

PDBase Instrument ID: PDBase

Instrument Address (serial port): 4

Figura 3.7. Detalle de la pestaña "System setup".

Seguidamente nos aparece la siguiente pantalla en la que debemos configurar los parámetros de comunicación, como el sistema de comunicación (*LAN, Phone Modem, etc*), puerto del módem, teléfono, servidor de e-mail, dirección IP, etc (Figura 3.8). Esta configuración se usará en el caso en el que hayamos elegido al principio el modo de comunicación remoto en vez de local por lo que hay que proporcionar estos datos para que sea posible la conexión a través de la red. En nuestro caso no se utilizó y por ello no facilitamos esa información. No obstante, cabe indicar que los técnicos de TechImp Systems transmitieron al equipo de trabajo del Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT) de la Universidad Carlos III de Madrid que este Software no estaba muy bien depurado y desaconsejaban su uso para aplicaciones remotas; este no es el caso del nuevo sistema de adquisición *PDCheck*, cuyo Software *PDControl* sí permite conexión remota a red local (ver sección 3.2). Para seguir, se selecciona continuar (“*Continue*”).

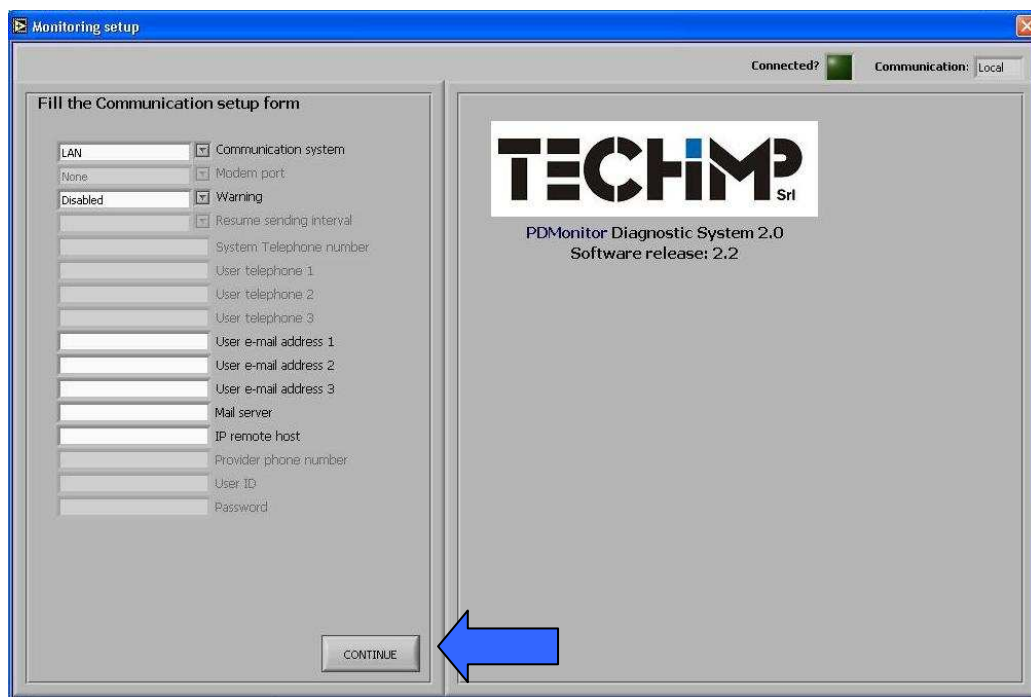


Figura 3.8. Captura de la pestaña “Communication setup”.

Llegamos a una pantalla importante del programa en la que tendremos que introducir la fecha y la hora (Figuras 3.9 y 3.10), es una información importante a la hora de analizar los datos, debido a que la aplicación graba y organiza los datos según la fecha y la hora. Además podremos seleccionar el intervalo de tiempo en minutos (*10, 20, 30, 45 min*) u horas (*1, 2, 3, 6, 12, 24 h*) entre medidas consecutivas y la unidad de disco del PC en la que queremos que se graben los datos del ensayo. Cada vez que iniciemos debemos actualizar la fecha y hora porque el programa la pierde. Pulsamos “*Continue*” para seguir con la configuración.

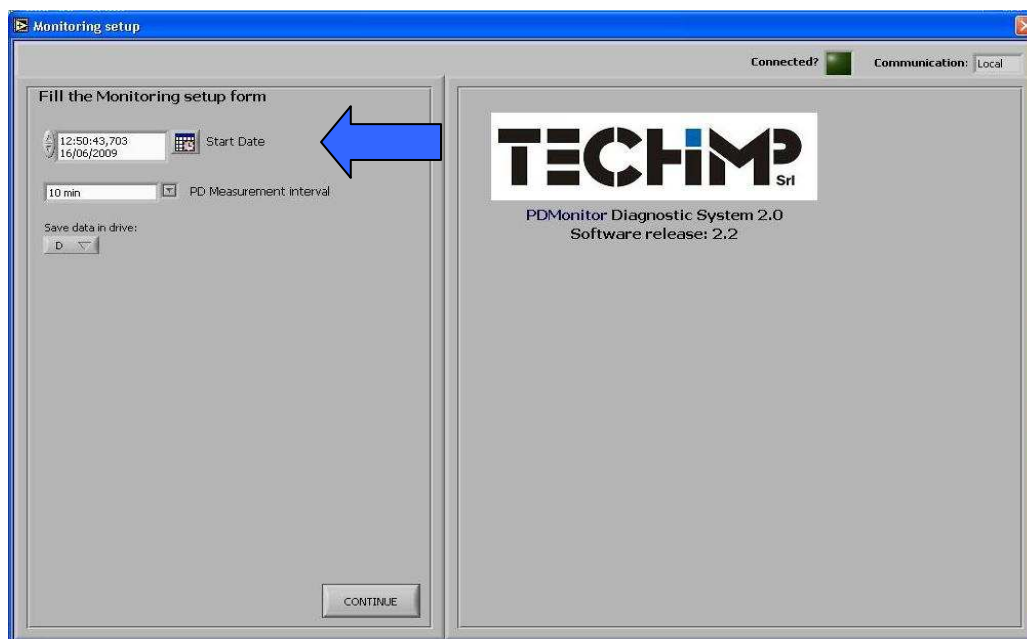


Figura 3.9. Captura de la pestaña “Monitoring setup”.

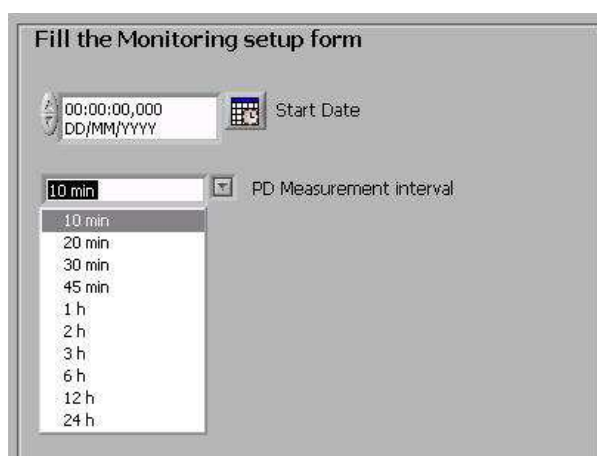


Figura 3.10. Detalle de la pantalla anterior.

Para continuar, deberemos seleccionar en la siguiente ventana el aparato de medida que queremos utilizar si es que tenemos varios, simplemente marcando la casilla correspondiente al nombre del aparato (Figura 3.11). En nuestro caso sólo aparece uno ya que sólo disponemos de un equipo. Se selecciona “OK” para continuar.

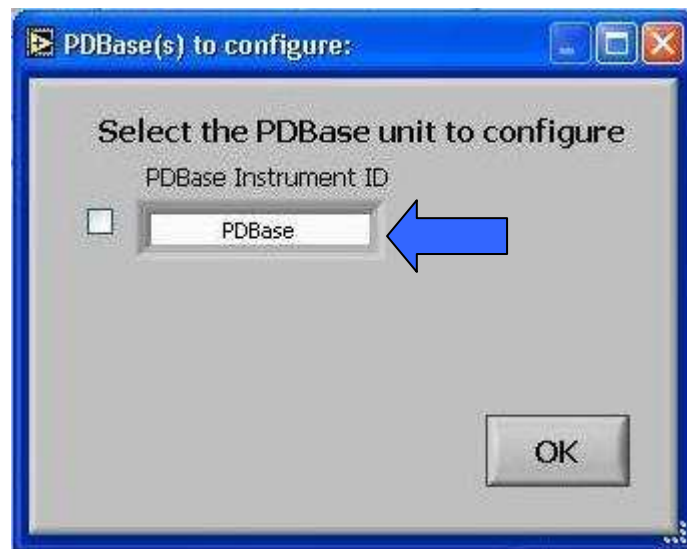


Figura 3.11. Detalle de la ventana de selección de unidad.

Llegados a este punto, y si toda la configuración está realizada correctamente, nos deberá aparecer una pantalla como la que sigue a continuación (Figura 3.12). A la izquierda podemos observar la unidad seleccionada con su correspondiente dirección. A la derecha nos muestran los canales activos por los que se graba que están iluminados en verde, ya que este software permite grabar por seis canales a la vez. El parámetro “*Repetitions*” únicamente sirve para dividir las grabaciones en diferentes subcarpetas dependiendo del canal y así tener los datos mejor organizados. Por último nos permite seleccionar la carpeta en la que queremos grabar los datos. Si lo dejamos por defecto, nos creará una carpeta por día y grabará en ella todas las adquisiciones del día; por el contrario si escribimos un nombre para la carpeta, grabará los datos en ella aunque también separándolos por día. Si no se pudiera acceder a las opciones de esta ventana, convendría revisar el conexionado del equipo a *PDBase* y al PC de control, así como las diferentes opciones previas. Una vez acabada la selección adecuada, se pulsa en “*Continue*”.

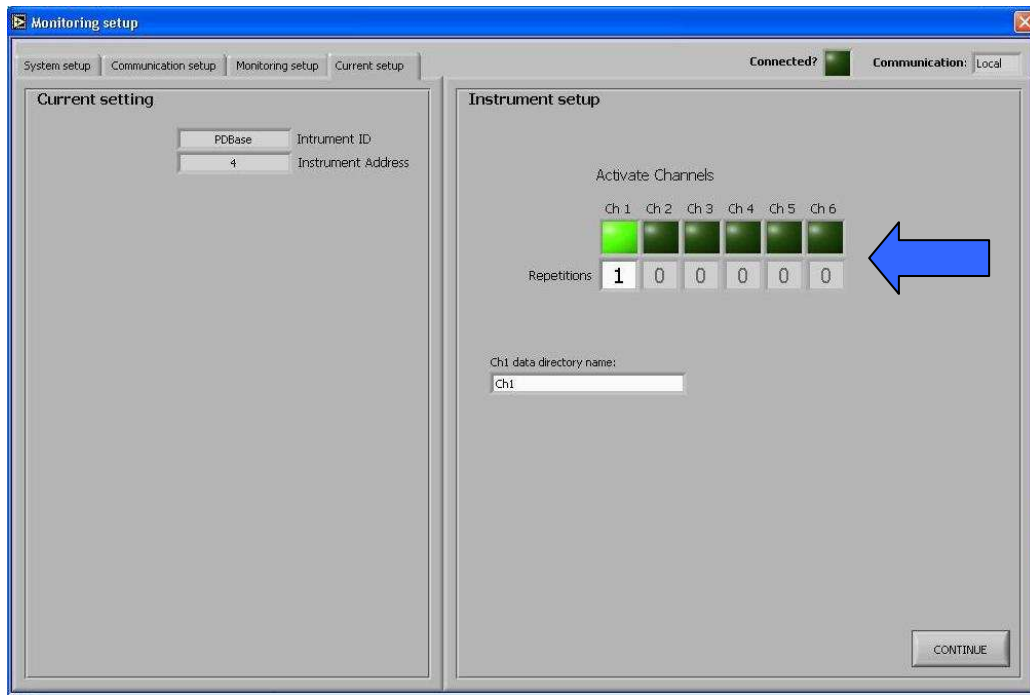


Figura 3.12. Captura de la pestaña “Current setup”.

En las figuras 3.13 y 3.14 podemos ver un resumen de la configuración que estamos realizando y unos huecos donde podemos introducir información o comentarios de interés que nos serán de gran ayuda a la hora de analizar e identificar los datos en el Software de procesamiento *PDPprocessing* ([Docavo, 2008]). Los ficheros fruto del proceso de monitorización son archivos *.pdb*, compatibles con el Software *PDPprocessing* que permite realizar un análisis exhaustivo del fenómeno de las descargas parciales. Estos ficheros se nombran según la fecha y hora de su adquisición. Lo más importante de esta pestaña es el tipo de circuito de medida con el que estamos trabajando, y que tendremos que seleccionar: “*TSS*” es el circuito directo y “*CCS*” es el circuito indirecto ([J. Díaz-Gautier, 2002]). Si no seleccionamos el circuito correcto los resultados de la monitorización pueden ser erróneos y llevarnos a una confusión a la hora de analizar los datos. También se puede seleccionar el tipo de sensor utilizado (en la figura, una ferrita de alta frecuencia, “*High Frequency Current transformer*”, ó *HFCT*) y el equipo bajo ensayo (“*Equipment Under test*”, *EUT*). Pulsamos “*Continue*”.

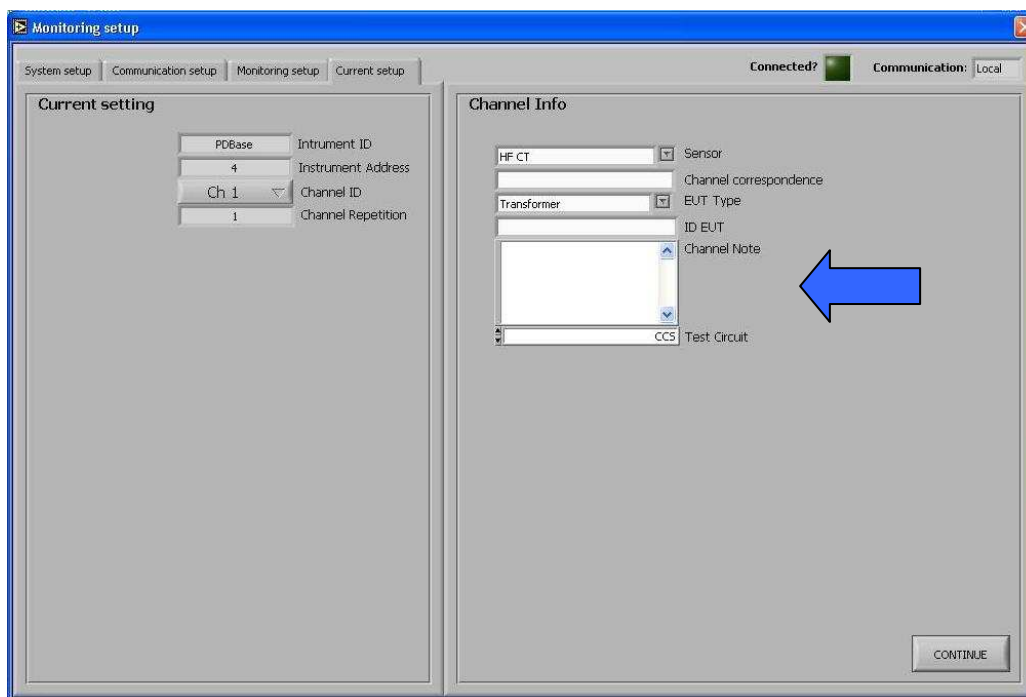


Figura 3.13. Captura de la pestaña “Current setup”.

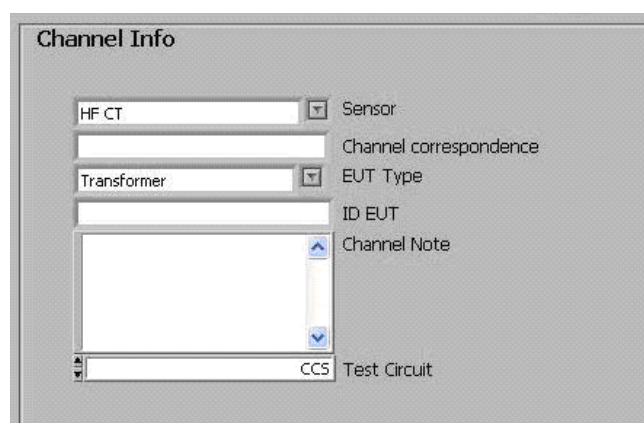


Figura 3.14. Detalle de la ventana anterior.

Otro detalle del Software *Monitoring setup* es que a medida que se configura el equipo, en la zona de arriba de la ventana, un testigo indica el estado de la conexión, que se encenderá si hay algún error de comunicación y además recuerda el modo de conexión seleccionado (Figura 3.15).

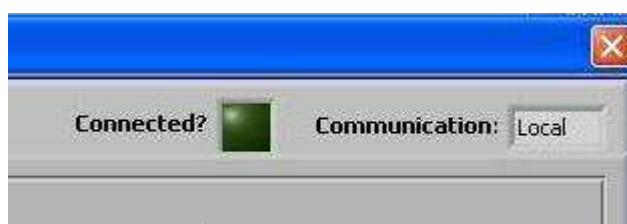


Figura 3.15. Detalle de la aplicación “Monitoring setup”.

Llegamos a una pantalla muy importante del proceso de configuración (Figura 3.16) en la que se observa la forma de onda de los pulsos de descargas parciales que se están produciendo en tiempo real: *amplitud* (V) frente a *tiempo* (s). Además se aporta información sobre la frecuencia de la tensión aplicada (Hz), la base de tiempos, amplitud máxima de la ventana (*“full scale”*), nivel de disparo (*“trigger level”*), etc. Estamos por tanto ante una aplicación Software con funcionalidad de osciloscopio virtual que permite visualizar descargas parciales de una manera similar al Software *PDAcquisition* ([Docavo, 2008]). Estos parámetros habrá que ajustarlos debidamente ya que son muy importantes para la adquisición. Concretamente deberemos de tener especial cuidado en configurar bien el nivel de disparo *“trigger level”*, que no es más que el nivel mínimo de la amplitud de las descargas a partir del cual empezamos a monitorizar, para conseguir detectar el mayor número de DP intentando no adquirir ruido. Igualmente la amplitud máxima del fenómeno a detectar es muy importante, pues si la actividad de DP diera lugar a descargas de magnitudes superiores al límite superior, los patrones de descargas parciales medidos (ficheros *.pdb* para analizar en *PDProcessing*) quedarán limitados a ese valor máximo y se perdería información estadística referente a la magnitud máxima medida. Cabe indicar que conforme el nivel de disparo sea mayor, con mayor seguridad se rechaza ruido eléctrico, pero por otro lado se podrían falsear los procesos estadísticos a analizar por adquirir siempre medidas de gran magnitud; sin embargo, niveles de *“trigger”* menores, son más susceptibles de captar ruido eléctrico, y tienen el canal de entrada frecuentemente ocupado midiendo descargas de menor magnitud (las más frecuentes, ver [J. Díaz-Gautier, 2002]).

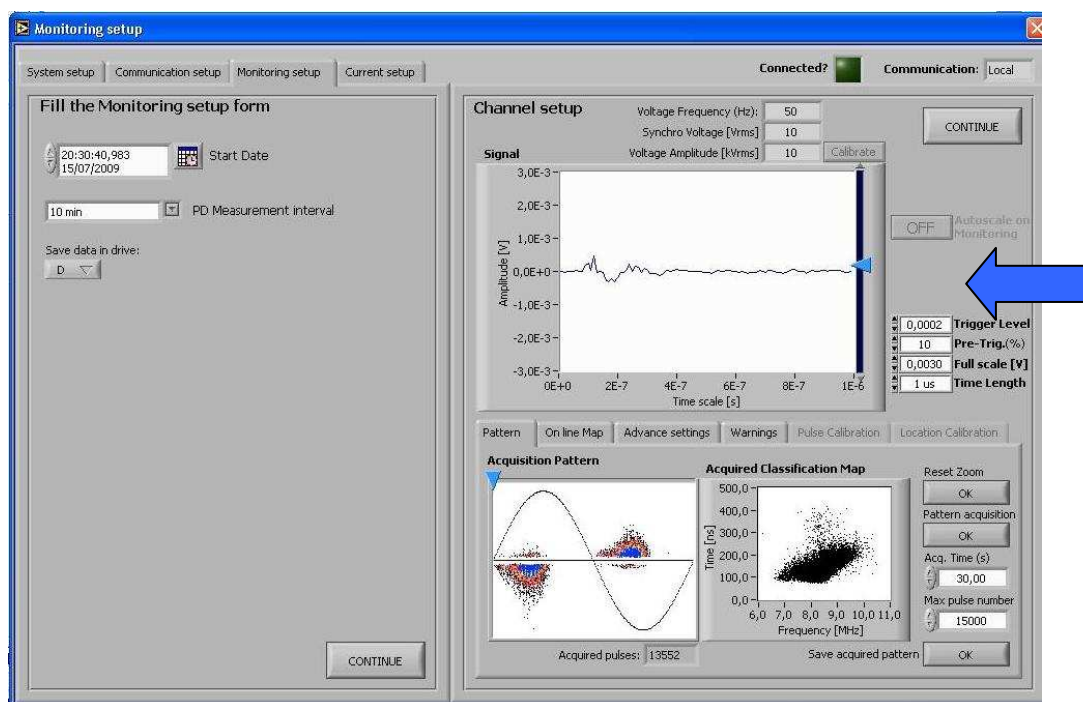


Figura 3.16. Captura de la aplicación monitorizando DPs “online”, donde podemos observar la forma de onda y el cluster que se forma con la detección de las descargas.

En la parte inferior de la pantalla podemos observar que existen varias pestañas (Figura 3.17). En la pestaña “*Pattern*”, pulsando el botón “*Pattern acquisition*” realizamos inmediatamente una adquisición y cuando ésta termine la aplicación nos mostrará el patrón clásico de descargas (magnitud frente a tensión aplicada) y el mapa de clasificación (tiempo y frecuencias equivalentes, ver [Docavo, 2008]) que permitirá separar fuentes de descargas parciales y ruido eléctrico mediante selección de nubes de puntos (*Clústers*, [Docavo, 2008]). Además podemos ajustar el tiempo de adquisición y el número máximo de pulsos a adquirir, y así, automáticamente, al llegar a uno de los dos valores el programa finaliza la adquisición. Si nos parece interesante, podemos guardar los datos de este ensayo en formato *.pdb* pulsando en “*Save acquired pattern*”. Sobre el mapa de clasificación se puede seleccionar con el ratón una determinada nube de puntos para analizar el patrón clásico correspondiente a un determinado *Clúster*; esta selección se elimina mediante la opción “*Reset Zoom*”.

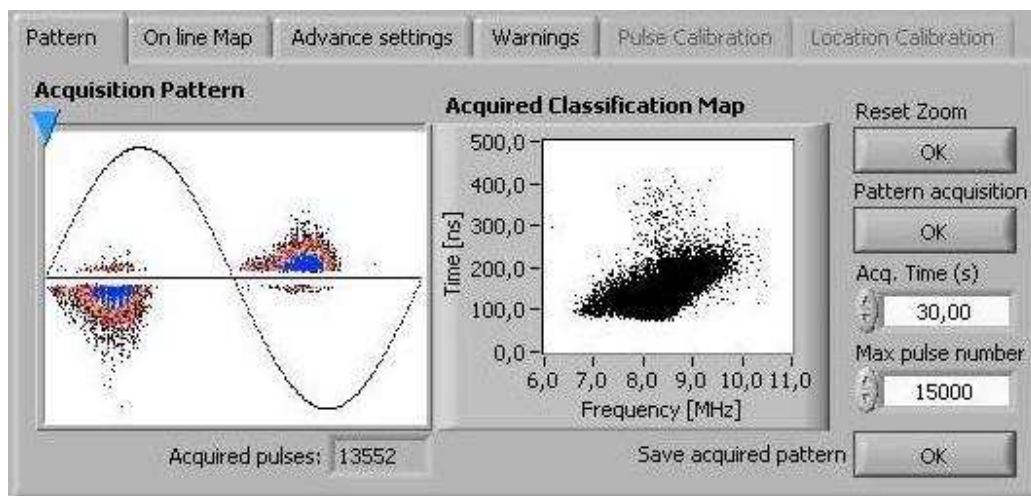


Figura 3.17. Detalle de la pestaña “*pattern*” de configuración de la adquisición.

La pestaña “*On line map*” nos muestra a tiempo real la adquisición de patrones clásicos y los *cluster* que se van formando (Figura 3.18). Si pulsamos “*Reset*” las dos gráficas se borrarán y comenzarán a representar las descargas nuevamente.

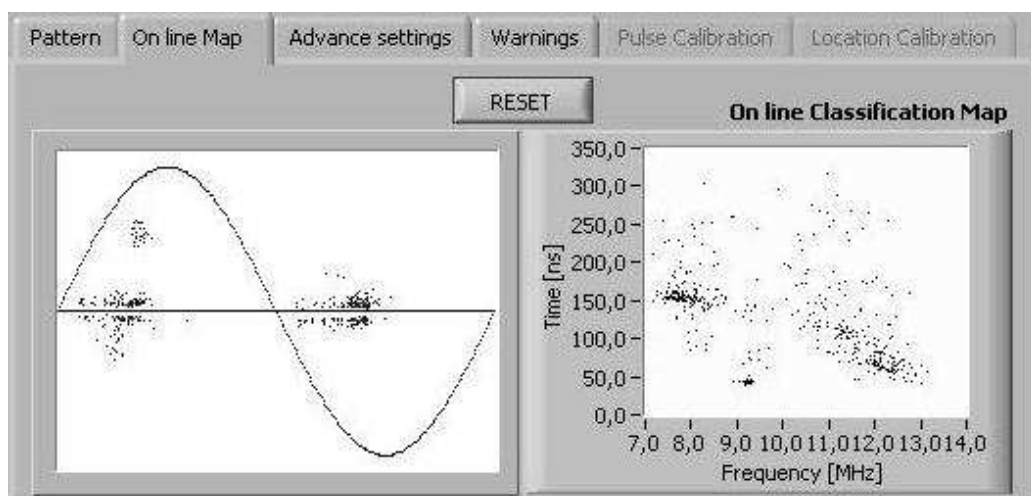


Figura 3.18. Detalle de la pestaña “*On line map*”.

En la pestaña “*Advance settings*” observamos un grupo de parámetros avanzados concernientes a la sincronización y procesado que no debemos tocar si no somos un usuario avanzado (Figura 3.19). Son parámetros referentes a el tipo de sincronización que utilicemos, dependiendo del circuito, o relacionados con el desfase de las DP. En caso de que se tenga certeza que hay DPs, pero no se discriminen bien en la fase de los patrones clásicos, se debe modificar el rango de sincronización (relacionado con el divisor de tensión del circuito de detección).

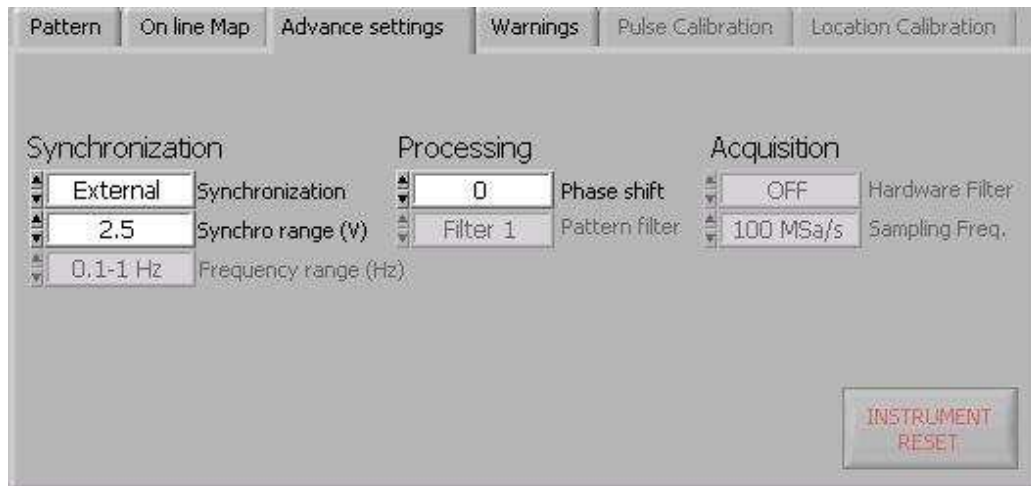


Figura 3.19. Detalle de la pestaña “*Advance settings*”.

La última pestaña, “*Warnings*”, está destinada a un filtrado de la señal pre-adquisición, para así grabar solo los datos que nos interesen, del estudio realizado mediante separación de los *cluster* (Figura 3.20). Lamentablemente esta opción del programa no está lo suficientemente depurada y tras realizar varias pruebas en el laboratorio y contactar con la empresa que nos proporcionó el software, se nos indicó que realmente sólo sirve para grabar adquisiciones “filtradas” dentro de este Software (ver figura 3.17), pero sin permitir aplicar este filtrado a la Monitorización de las DPs programadas tras salir de esta aplicación. Igualmente, esta pestaña permite establecer límites de alarma para valores superiores a ciertos umbrales de amplitud de DP ó número de descargas por ciclo (N_w).

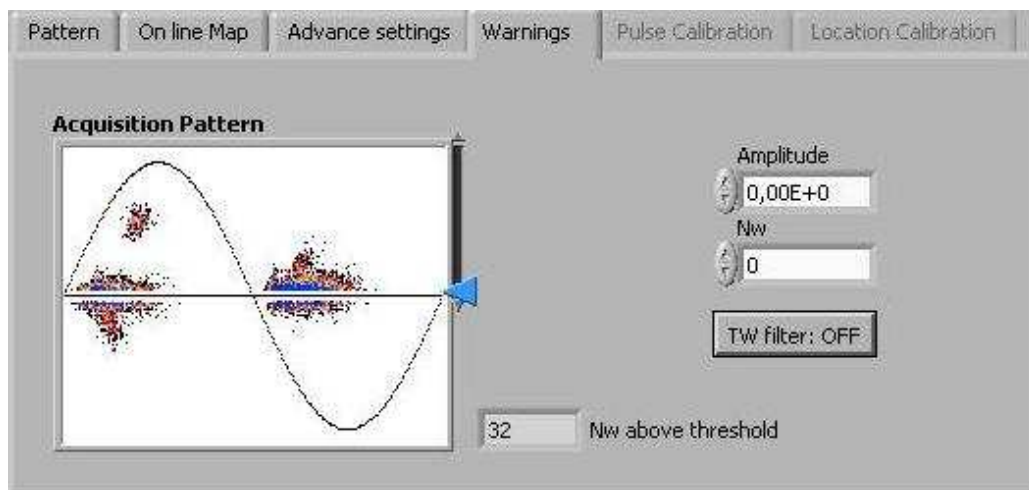


Figura 3.20. Detalle de la pestaña “Warnings”.

Para establecer el filtrado sobre determinados pulsos, sólo habría que pinchar sobre el botón “*TW filter*” y nos aparecerá la siguiente ventana (Figura 3.21). Seleccionando el *cluster* deseado, el programa debería aislar este tipo de descargas, pero como hemos podido comprobar esto sólo es posible para las adquisiciones que se hagan mientras el Software esté abierto.

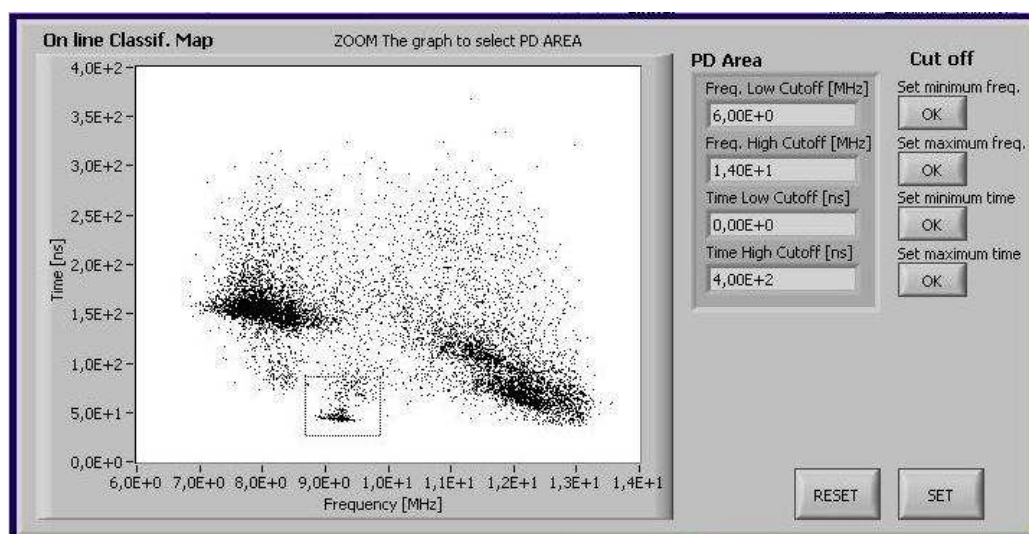


Figura 3.21. Detalle de la ventana donde se configura el filtro TW.

Una vez configurado todo lo anterior correctamente y revisando todos los parámetros, procedemos a pulsar el botón “*Continue*” (ver figura 3.16), de manera que nos aparecerá la siguiente pantalla (Figura 3.22), en la que nos pregunta si queremos configurar otros *PDBase*. Si está todo conforme se selecciona “*No*”, ya que sólo utilizamos un *PDBase*, habremos concluido la configuración y el sistema estará preparado para funcionar correctamente.

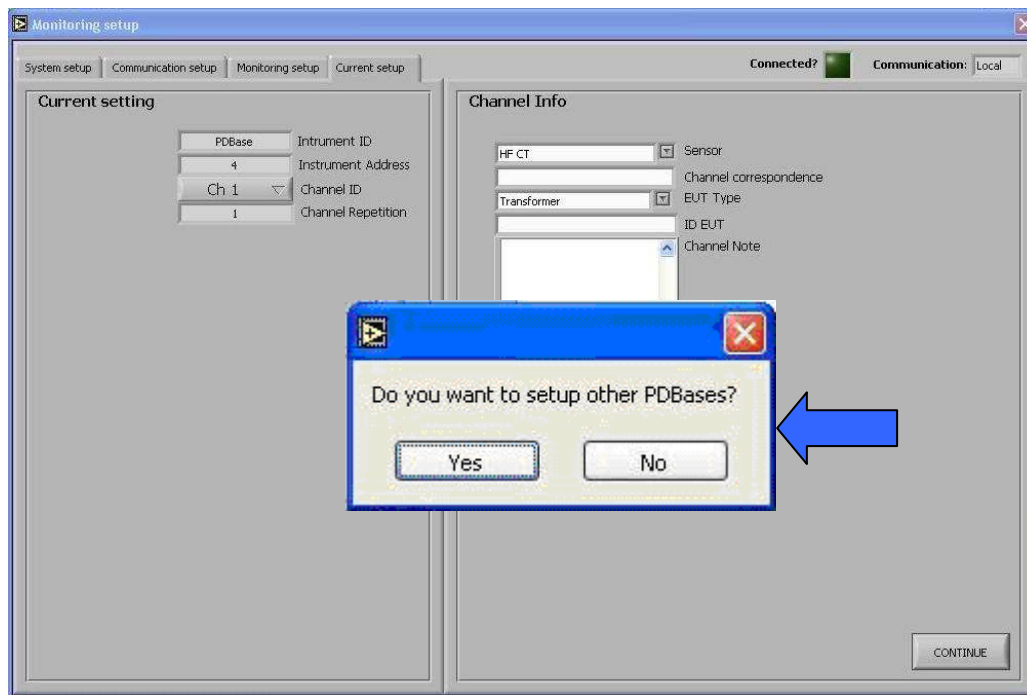


Figura 3.22. Captura de la aplicación “Monitoring setup”.

Para este proyecto nosotros hemos utilizado un portátil, y por ello, observamos que para que la monitorización se realice de manera satisfactoria, deberemos configurar correctamente el modo de energía del portátil u ordenador convencional para evitar el modo hibernación, en cuyo caso el ordenador deja de funcionar y se detiene la monitorización. Este software requiere que el ordenador esté funcionando en todo momento mientras estamos monitorizando algún equipo, debido a que los datos de los ensayos se almacenan en el disco duro del ordenador.

3.1.2.- Aplicación *Client PCE*.

Otra aplicación del software *PDMonitor*, es el programa *Client PCE*, aunque es más simple que el *Monitoring Setup*, pero no por ello es menos importante. Éste software tiene como función controlar el estado de la monitorización y proporcionarnos información acerca de ello. Se compone de tres casillas que se iluminan en el caso de que esas acciones se estén realizando (Figura 3.23). Una es “*Communication error*” que se iluminará en el caso de que haya un problema en la comunicación para crear una señal de alarma e intentar solucionarlo si queremos continuar monitorizando. La segunda es “*Remote*” que estará iluminada en el caso en que estemos trabajando con un equipo de monitorización de forma remota. Y la tercera es “*Pause*”, que se encenderá mientras el equipo no realice ninguna grabación de datos; así sabremos cuando estamos tomando datos de descargas parciales. Además cuenta con un botón de “*Stop*” que detendrá la monitorización en cualquier momento; en ese caso, para volver a monitorizar habría que volver a iniciar el Software *Client PCE*, que siempre se ejecutará según los últimos parámetros grabados de *Monitoring Setup*.



Figura 3.23. Captura de la aplicación “*Client PCE*” durante una adquisición.

Se trata de una ventana simple, pero con la que controlamos todo el sistema de monitorización en todo momento. Este software por defecto, una vez instalado, se ejecuta siempre que se enciende el ordenador, y si se encuentra conectado al equipo *PDBase* continuará con la monitorización con la última configuración proporcionada, por lo que si no queremos continuar con las adquisiciones de datos deberemos pulsar “*Stop*”. Como se ha comentado anteriormente, si en un momento procedemos a continuar con la monitorización sólo deberemos abrir este programa y se iniciará el proceso. Además cuando se ejecuta *Client PCE* automáticamente realiza una primera adquisición de datos del proceso de monitorización.

3.1.3.- Aplicación *Resume Viewer*.

La aplicación *Resume Viewer*, se utiliza una vez hemos realizado una monitorización en un aparato o máquina durante un tiempo, para realizar un pre-análisis de los datos obtenidos. Es un programa bastante sencillo de utilizar y procedemos a su descripción detallada.

Tras su ejecución nos aparecerá la siguiente pantalla (Figura 3.24), nos pedirá un archivo *.reu, por defecto “*resume.reu*”. Esta aplicación utiliza ese tipo de archivo, que recoge toda la información de las adquisiciones que se han realizado en ese día, y por ello lo encontramos en todas las carpetas en las que se graban los archivos de la monitorización. Por defecto, las adquisiciones se guardan en carpetas separadas por día, por lo que, en cada carpeta habrá un archivo “*resume.reu*”. Esto nos cargará directamente en la aplicación todos los archivos, resultado de la monitorización según el orden en que se han tomado.

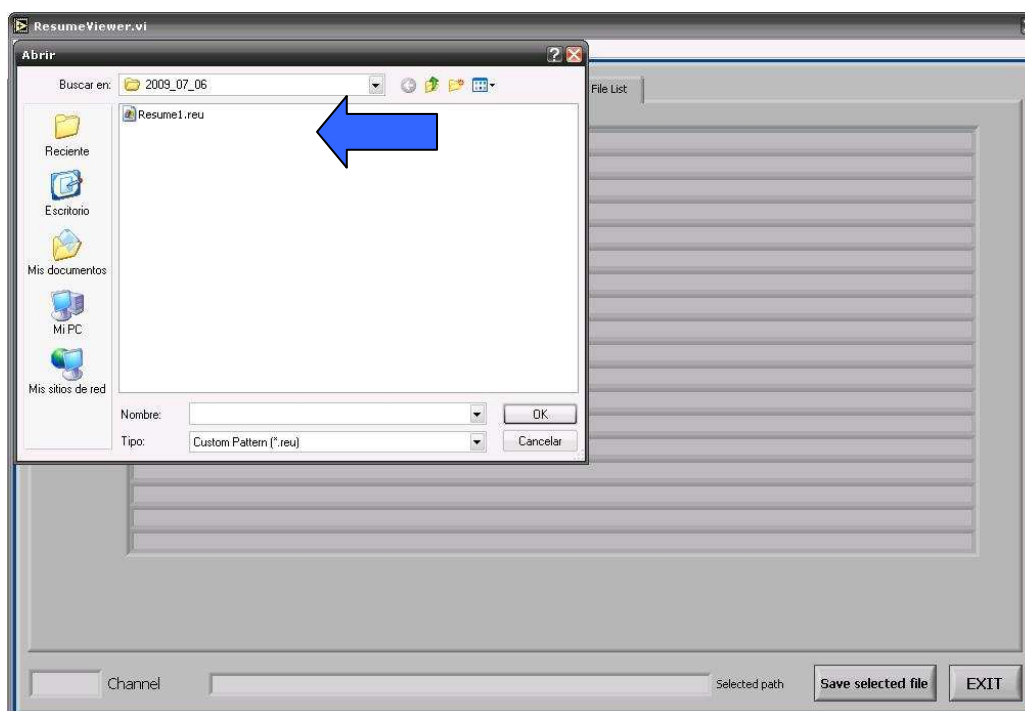
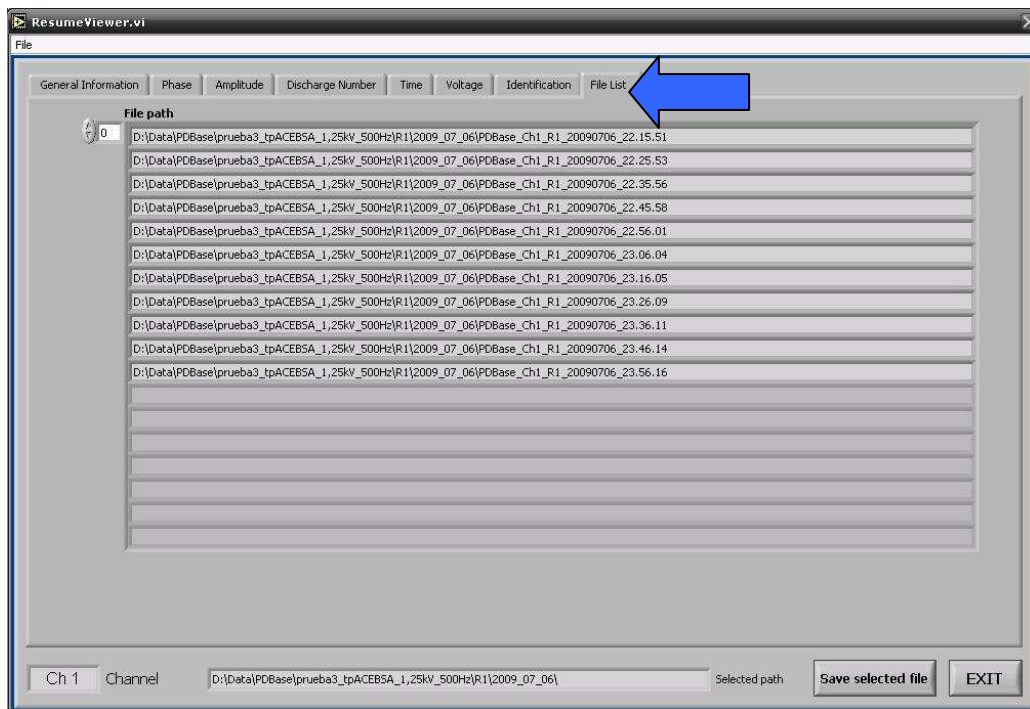
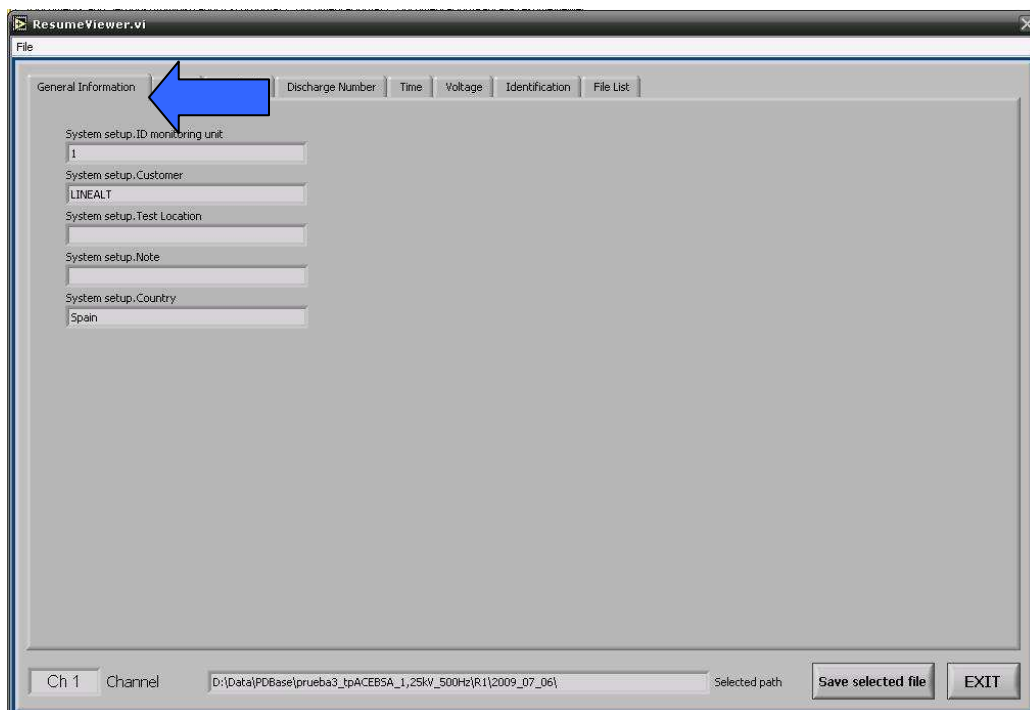


Figura 3.24. Captura de la aplicación “*Resume viewer*”.

Seleccionando la pestaña “*File List*” (Figura 3.25), nos mostrará el listado de archivos de las adquisiciones del día o carpeta correspondiente, ordenados según la hora de grabación.



En la pestaña “*General Information*” podemos observar un resumen de algunos datos de la monitorización (*Cliente, lugar del ensayo...*) que nos pueden resultar importantes a la hora de identificarlos para trabajar (Figura 3.26).



La pestaña “*Phase*” nos muestra mediante un gráfico (Figura 3.27), ciertos parámetros de fase de aparición de DP frente al número de adquisición. Analiza las descargas que se han producido en cada adquisición y nos proporciona, separando por polaridad, los parámetros “*Min phase*”, “*Mean phase*”, “*Phase Interval*”, es decir, la fase mínima, la fase media y el valor medio de la fase de la tensión aplicada en que se producen las descargas, respectivamente. Estas magnitudes se registran tanto para los pulsos de polaridad negativa como para los de polaridad positiva. Mirando la leyenda, sabremos que significa cada gráfica dependiendo del color.

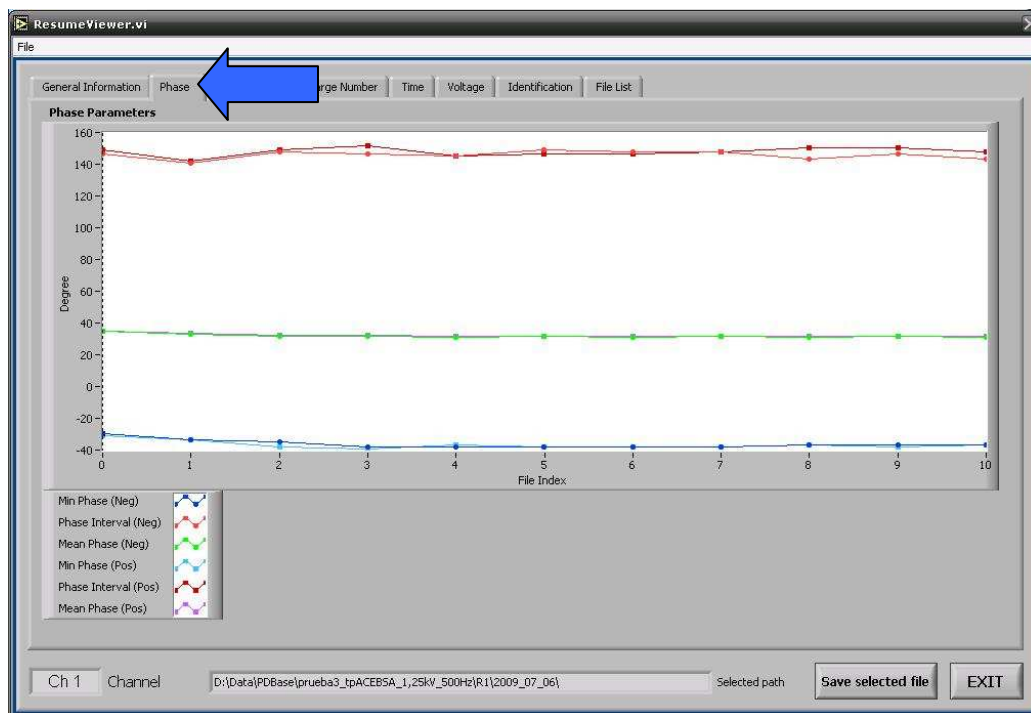


Figura 3.27. Detalle de la pestaña “*Phase*”.

En la pestaña “*Amplitude*” se observa una gráfica resumen de cómo evolucionan los parámetros “*Alfa*”, “*Qmax 95%*”, “*Beta*” y “*Skewness*” de cada adquisición ([Docavo, 2008]), distinguiendo entre descargas positivas y negativas (Figura 3.28).

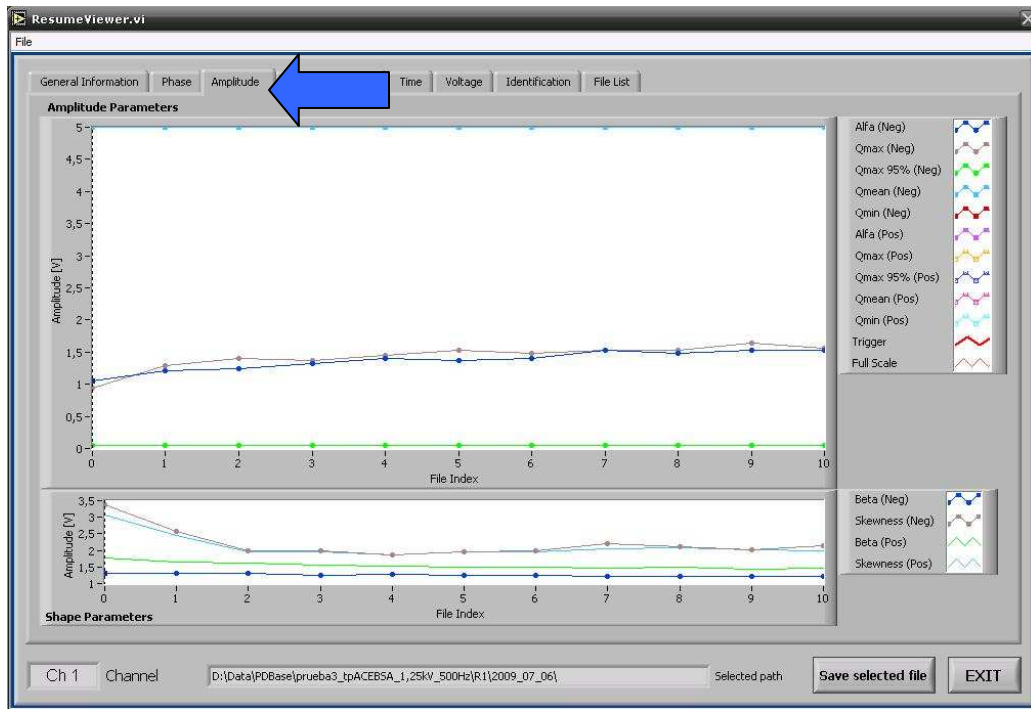


Figura 3.28. Detalle de la pestaña “Amplitude”.

La siguiente pestaña “Discharge number” (Figura 3.29), permite ver el n° de descargas parciales distinguiendo la polaridad (N), el número de descargas totales (N_{tot}), número de descargas por segundo (N/s) y las descargas por periodo (Nw), para cada adquisición de datos.

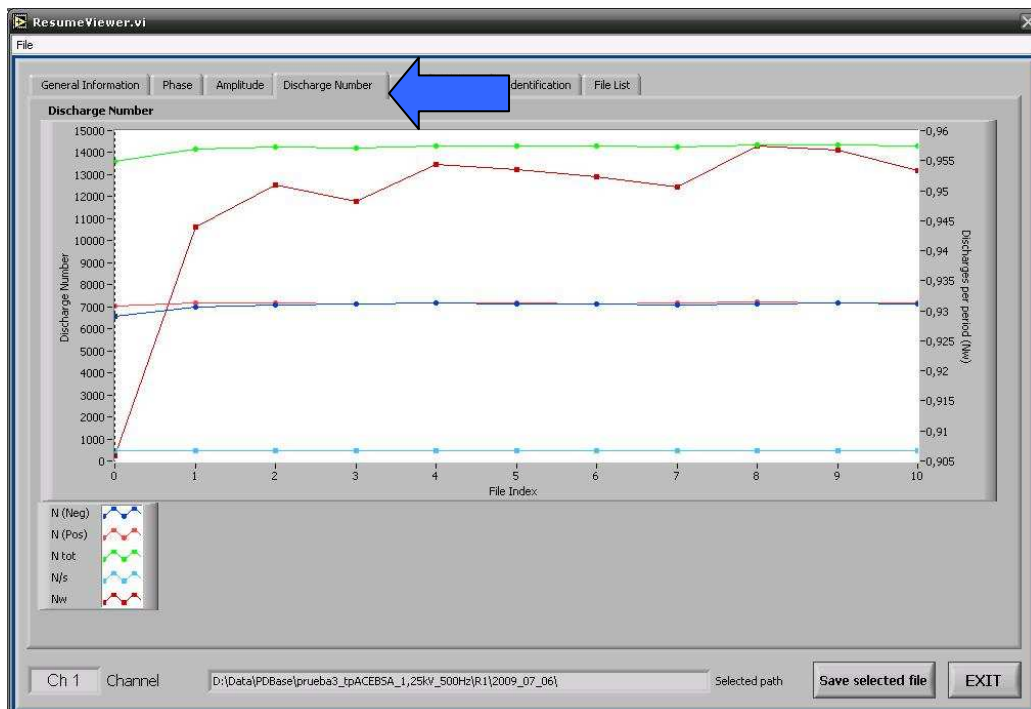


Figura 3.29. Detalle de la pestaña “Discharge number”.

La pestaña “Time” representa el tiempo normalizado entre descargas, parámetros *P1-P4* ver [Docavo, 2008], y el tiempo de duración de las adquisiciones (Figura 3.30). El tiempo normalizado entre descargas es un parámetro muy importante, debido a que es un método para detectar la presencia de arborescencias eléctricas. Cuando existen tiempos entre DP muy inferiores a *10ms* se considera éste fenómeno se está produciendo, [J. Díaz-Gautier, 2002]. Debido a que este software no está lo suficientemente depurado, los resultados proporcionados en esta pestaña son erróneos y no tienen ninguna relevancia.

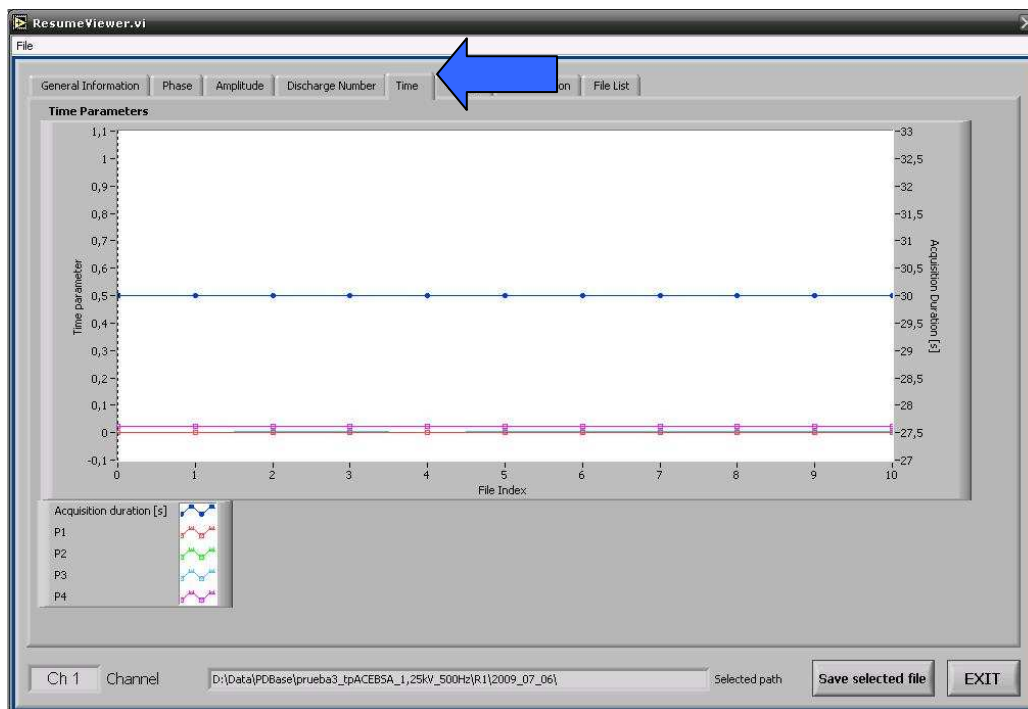


Figura 3.30. Detalle de la pestaña “Time”.

Esta pestaña “Voltage”, proporciona información interesante, indica la frecuencia de la tensión a la que se realiza la medición de descargas parciales. Por tratarse de un ensayo de envejecimiento por DP, se trabaja con frecuencias mayores a lo convencional para reducir los tiempos hasta fallo, y se observa que generalmente la frecuencia se mantiene constante en los ensayos realizados (Figura 3.31).

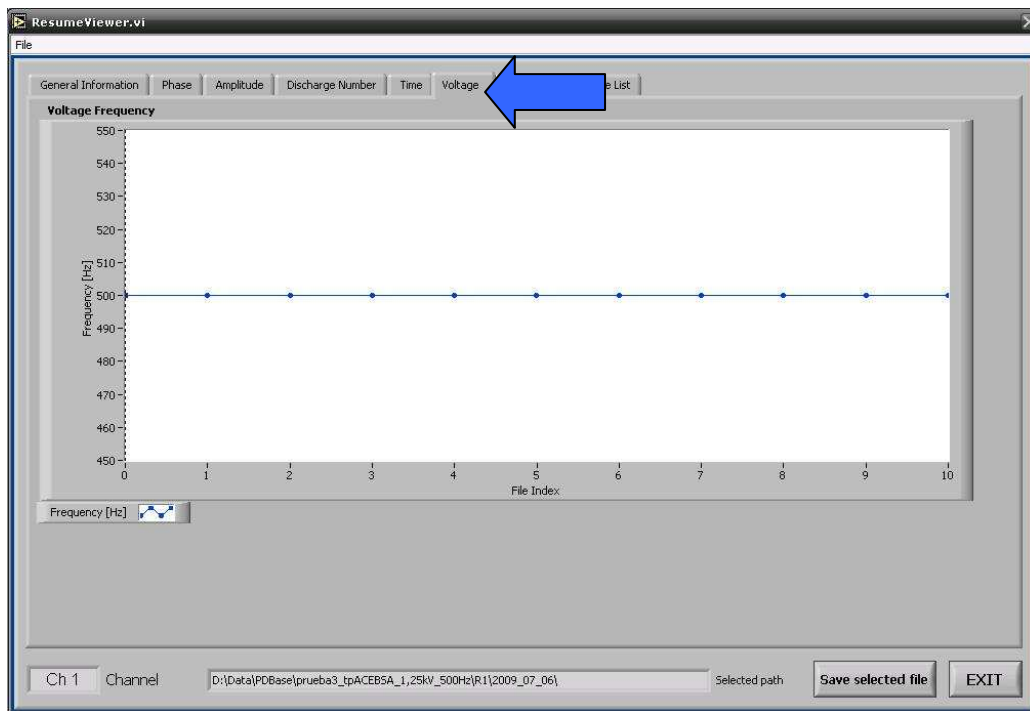


Figura 3.31. Detalle de la pestaña “Voltage”.

La última pestaña de la aplicación, “*Identification*” es una de las más interesantes, pues nos clasifica mediante una gráfica el tipo de descargas parciales que existe en cada adquisición (*corona*, *superficiales*, *internas*, ver Figura 3.32). De todas formas, como hemos comentado anteriormente, este programa no está muy depurado y esta opción no funciona correctamente por lo que nos muestra unos resultados erróneos. Cabe destacar que este análisis realizado con este Software es una primera aproximación al estudio de la evolución de las DPs, que debe después realizarse con *PDProcessing*, entre otras cuestiones, para poder separar ruido eléctrico que se superpusiera a las descargas parciales adquiridas con *PDMonitoring*. En el caso de que realizara un análisis correcto, sería una función muy importante de la aplicación porque nos permitiría realizar un pre-análisis de los datos de una manera rápida y sencilla. De esta forma se podría tener una percepción rápida sobre la evolución de la actividad de DPs en el sistema observado.

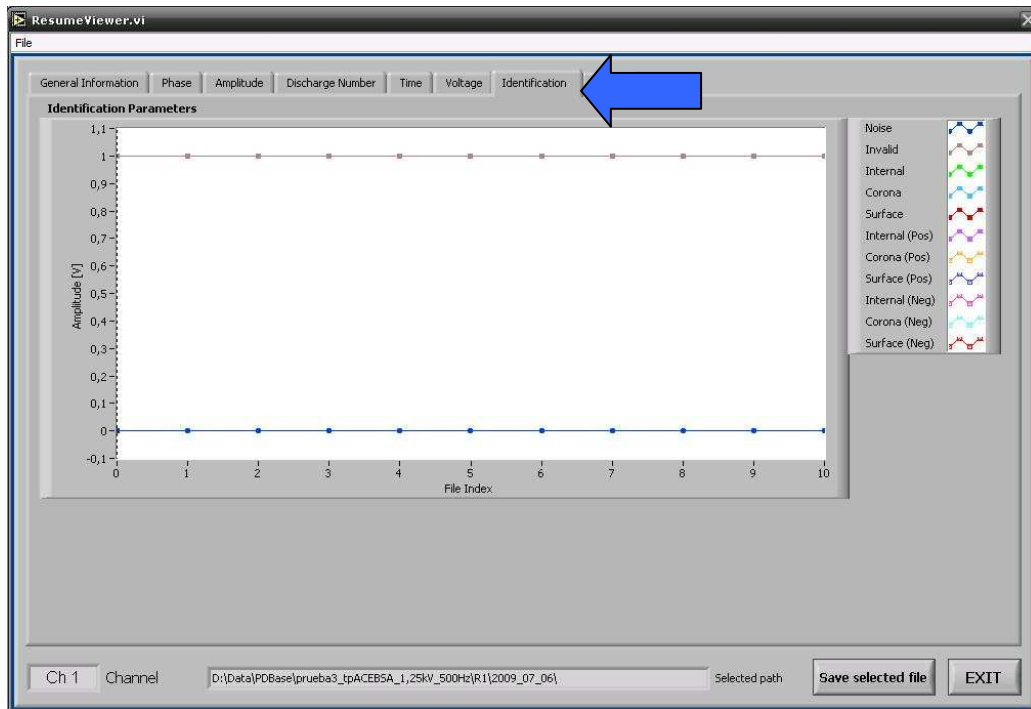


Figura 3.32. Detalle de la pestaña “Identification”.

Para terminar, y como hemos argumentado antes, tenemos que decir que al medir varias fuentes de DP de forma simultánea, sin poder separar mediante *clústers*, las adquisiciones incluyen todo lo que supere el “*trigger level*”, y esto hace que el pre-procesado se haga sobre unos datos bien tomados, pero que estadísticamente pueden no ser relevantes. Por otro lado observamos que la aplicación tiene un buen planteamiento y podría ser muy útil a la hora de trabajar con este tipo de información.

3.2.- Software *PDCheck Control*.

En la actualidad existe un software más avanzado, *PDC Control*, que hemos recibido en la Universidad Carlos III de Madrid junto con el equipo *PDCheck* en los últimos días, y que incluye bastantes mejoras en comparación con la aplicación *PD Monitor* y el equipo *PDBase*. Esencialmente, *PDC Control* integra las funciones de adquisición y monitorización en un único Software, lo que ya es una mejora respecto a *PDBase* (que utilizaba *PD Acquisition* y *PD Monitoring*).

El equipo *PDCheck* es una unidad de adquisición de última generación, que mejora sustancialmente al equipo *PDBase*. Como se muestra a continuación, posee tres canales de entrada de alta frecuencia para adquisición de datos, con sus correspondientes LED (que se iluminan de forma continua en el caso de producirse un error en la comunicación o parpadean cuando se está adquiriendo información), una entrada para sincronización y una conexión de tierra (Figura 3.33).

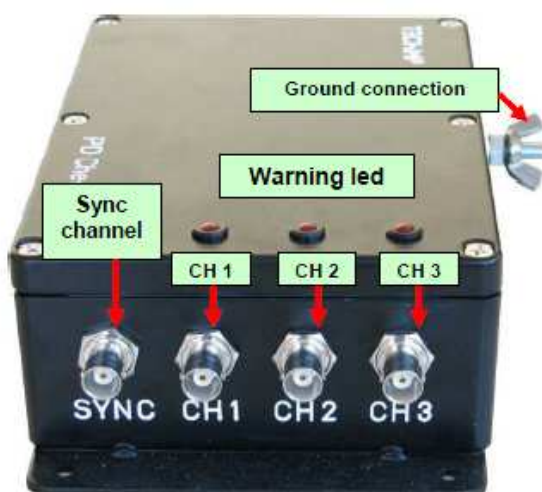


Figura 3.33. Fotografía de las conexiones del *PDCheck* [*PDCheck Manual*, 2008].

Además está equipado con un puerto LAN, para la conexión con el ordenador, un puerto “*SP*”, un conector para alimentación (“*PS*”, *power supply*), un puerto “*CC*” (*clean contacts*) y dos puertos “*ACS*” y “*DCS*”, para distintas magnitudes de entrada (Figura 3.34).



Figura 3.34. Imagen de las conexiones del *PDCheck* [*PDCheck Manual*, 2008].

De aquí en adelante procederemos a la descripción del Software en lo que respecta, especialmente, a la monitorización de DP. Para empezar a utilizar la aplicación, debemos tener claro antes de nada la forma de conexión al *PDCheck*, ya que nos permite dos modos de conexión, modo *local* con un ordenador en el mismo laboratorio (Figura 3.35) o de modo *remoto* a través de Internet o una red LAN en un ordenador alejado del laboratorio (Figura 3.36), al igual que en el anterior software.

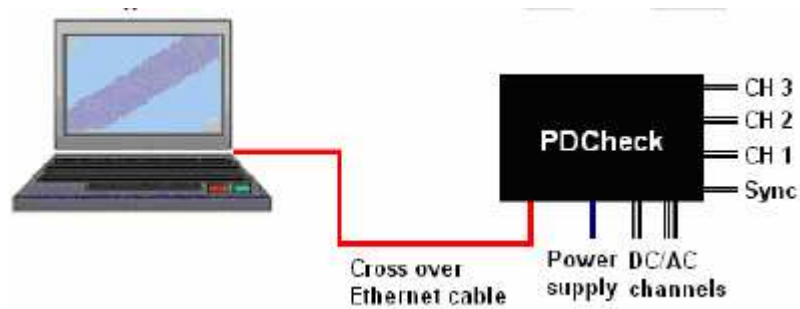


Figura 3.35. Esquema de conexión en modo local [PDCheck Manual, 2008].

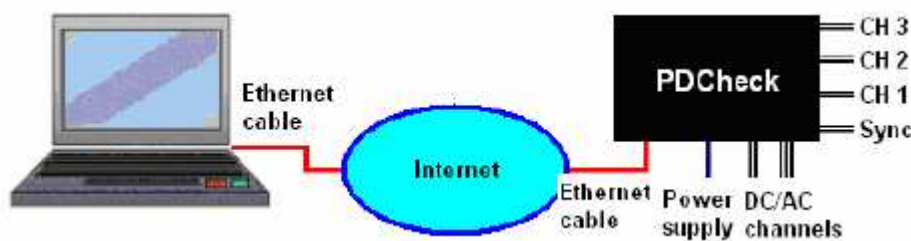


Figura 3.36. Esquema de conexión en modo remoto [PDCheck Manual, 2008].

Dependiendo de la forma de conexión tendremos que introducir determinadas direcciones IP y demás parámetros. En el caso de la conexión en modo *local* (la utilizada en este trabajo), se debe marcar la dirección IP 163.117.133.27 con puerto de acceso 3000. Para la conexión en modo *remoto* será necesario que el equipo esté conectado a una red LAN o Internet, la dirección IP 163.117.133.27 y la puerta de enlace 163.117.133.2.

Una vez que iniciamos el software, observamos la pantalla principal y más importante (Figura 3.37), donde podemos ver la detección de DP en línea, forma de onda y patrón clásico de descargas, ajuste de rangos de magnitud que queremos detectar (“*Full scale*”, “*trigger level*”, “*time length*”....) y dos testigos (“*link*”, “*Sync Status*” en la zona inferior de la pantalla), que nos indican si la comunicación y la sincronización es correcta. Además en esta pestaña podemos realizar una adquisición en un cierto instante a nuestro antojo, incluso realizar un análisis rápido del tipo de descargas u otros parámetros, sin necesidad de grabar ficheros en disco duro.

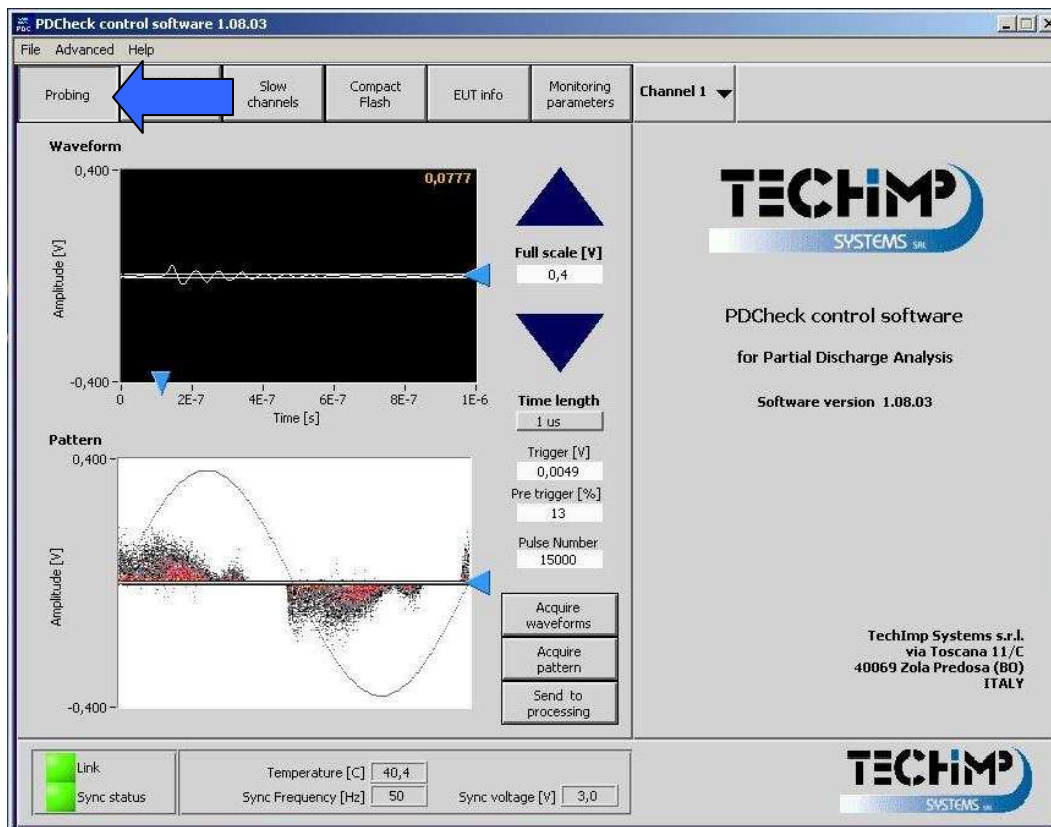
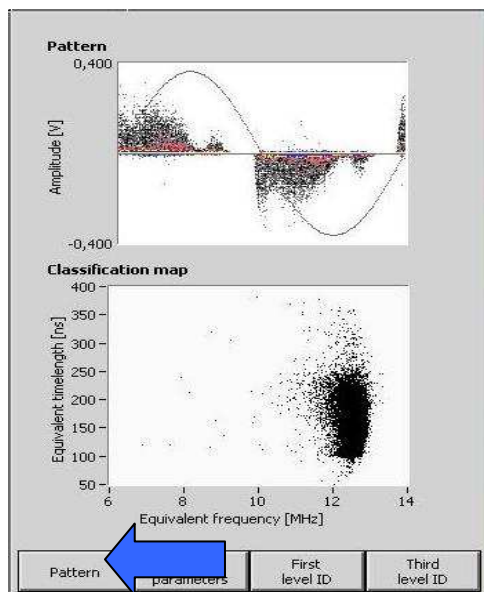
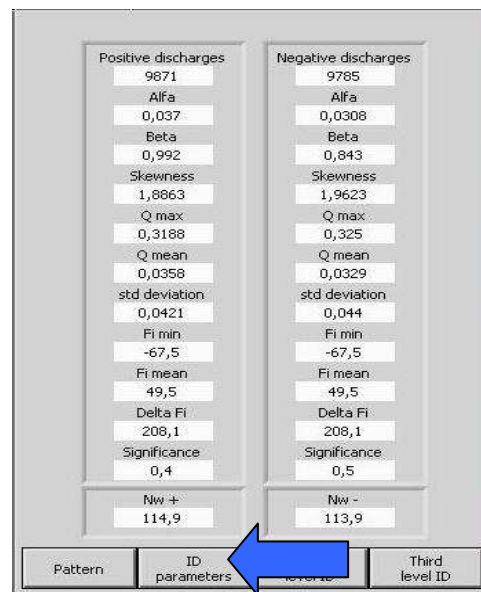


Figura 3.37. Captura de la aplicación “PDCheck Control”, pestaña “Probing”.

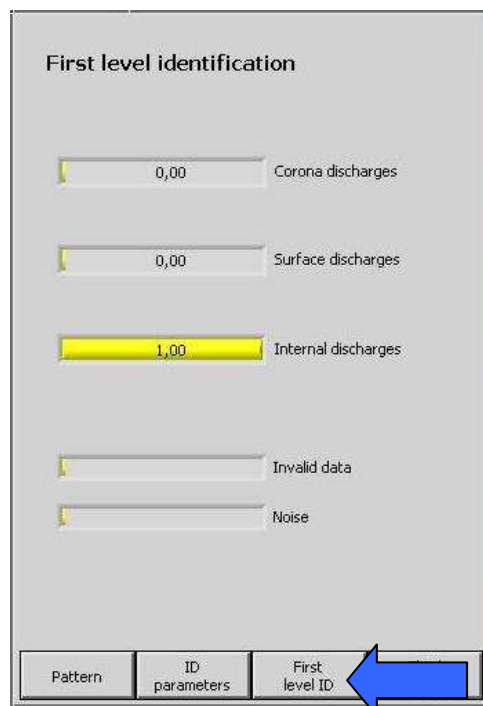
Los botones “Acquire waveforms” y “Acquire pattern” permite guardar ficheros de adquisición de manera similar a *PDAcquisition* de *PDBase* ([Docavo, 2008]). Por otro lado, como hemos comentado antes, si realizamos una adquisición, bien sea con forma de onda o simple, pulsando el botón “Send to processing” podemos realizar un análisis de los datos in situ sin necesidad de recurrir a ficheros grabados en disco duro analizados con *PDProcessing*. En la ventana de la derecha nos muestra el patrón de descargas y el mapa de clasificación (Figura 3.38), un resumen de los parámetros estadísticos más importantes o bien una pre-identificación del tipo de las DP. Éste análisis se hace sobre el número de pulsos registrados en la casilla “Pulse Number” de la figura 3.37.



A.



B.



C.

Figuras 3.38.A. Detalle de la ventana “Pattern” donde observamos el patrón de DP y el mapa de clasificación, B. Detalle de la ventana “ID parameters” donde se pueden ver datos de las DP separados por polaridad y C. Detalle de la ventana “First level ID” que nos informa del tipo de DP.

La pestaña “Acquisition settings” nos sirve para configurar el aparato antes de comenzar con las adquisiciones (Figura 3.39). Debemos seleccionar el tipo de circuito de detección utilizado, *directo* “TSS” o *indirecto* “CCS”, el intervalo de tiempo entre pulsos detectados “Dead time”, el nombre del fichero de datos, la carpeta y el mapa de filtrado “TW Map Filter” en el caso que lo necesitemos. Además nos permite definir el número de pulsos y el tiempo para adquisiciones de pulsos con forma de onda. De igual manera se puede introducir un desfase artificial “Phase Shift” a las adquisiciones previas.

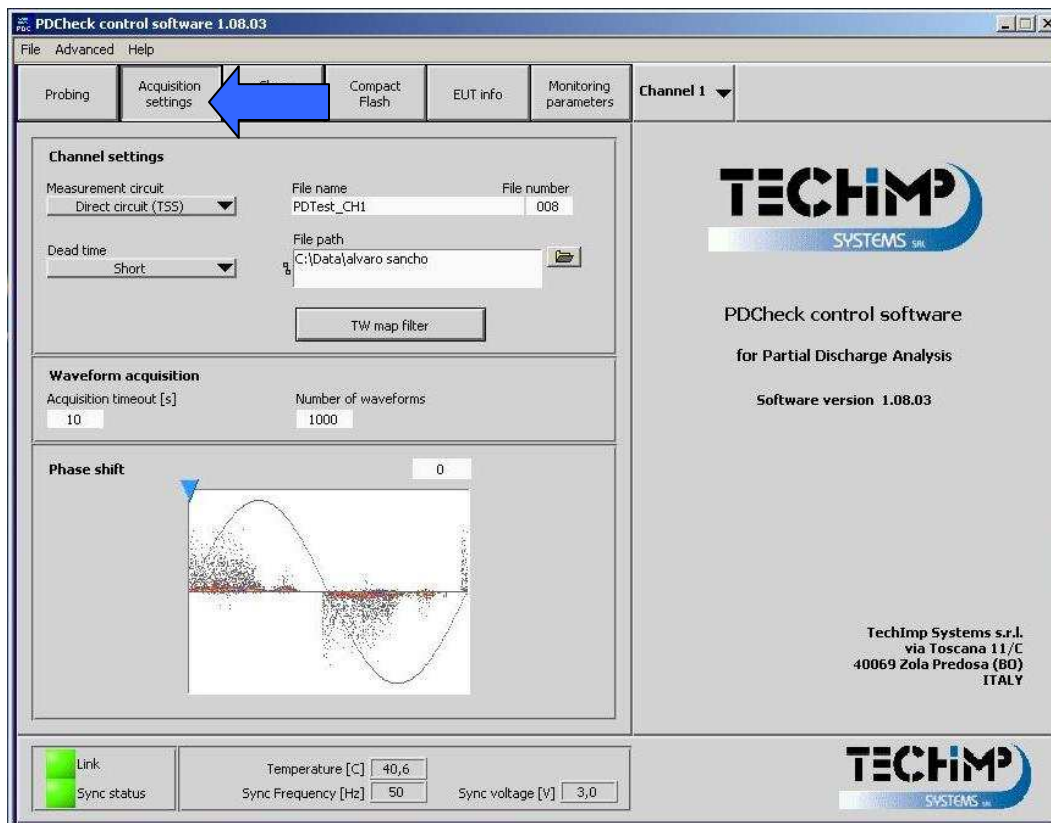


Figura 3.39. Captura de la aplicación “PDCheck Control”, pestaña “Acquisition settings”.

Si utilizamos el “filtrado TW” nos aparecerá la siguiente ventana donde podemos elegir qué tipo de descargas queremos incluir o excluir en la adquisición de datos (Figura 3.40), filtrando así la señal a través de los clusters incluidos/excluidos y recogiendo datos sólo de lo que nos interesa. Pulsando el botón “Delete all filters”, eliminamos cualquier filtro aplicado a la adquisición.

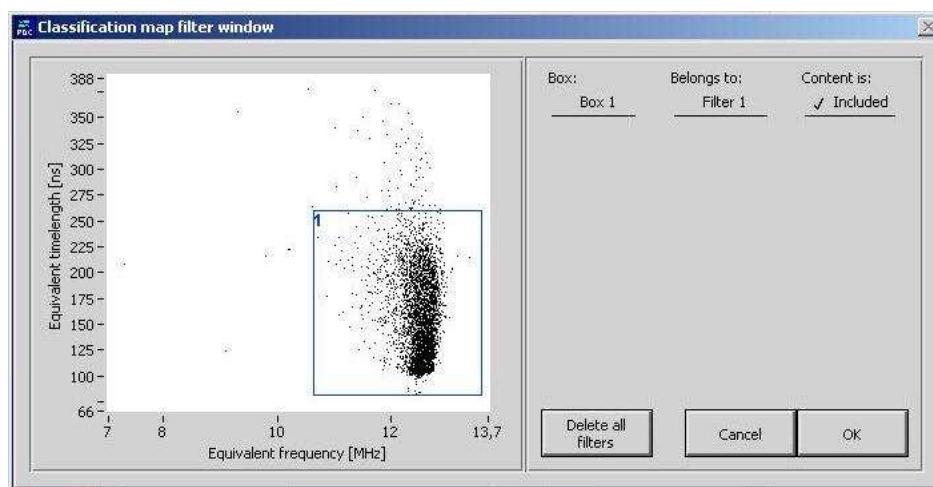


Figura 3.40. Detalle de la ventana donde se configura el filtrado TW.

A continuación observamos la pestaña más importante en cuanto a monitorización se refiere (Figuras 3.41 y 3.42). En esta ventana configuramos todas las características: el canal por el que queremos grabar (al tener 3 canales de entrada, podemos tomar datos de la fase que convenga en el caso de ser trifásico el aparato eléctrico estudiar), el intervalo de tiempo entre adquisiciones (se puede ajustar de 2 minutos a horas e incluso días), el tiempo de adquisición y el número de pulsos, el “filtrado TW” en el caso que se quiera utilizar y una opción nueva llamada “Autoescalado”, que no es más que una forma de adquisición que ajusta los órdenes de magnitud de detección de descargas dependiendo de la magnitud de las descargas que se produzcan. Si no utilizamos esa opción el software grabará los datos utilizando la configuración elegida por nosotros (a través de la selección de *Full Scale* y *trigger level* en la figura 3.37). Además existe otra opción donde podemos adquirir datos de las dos formas, con nuestro rango de detección y con el optimizado por la aplicación; esto supone que los datos de la monitorización se grabarán dos veces y podremos elegir el que convenga.

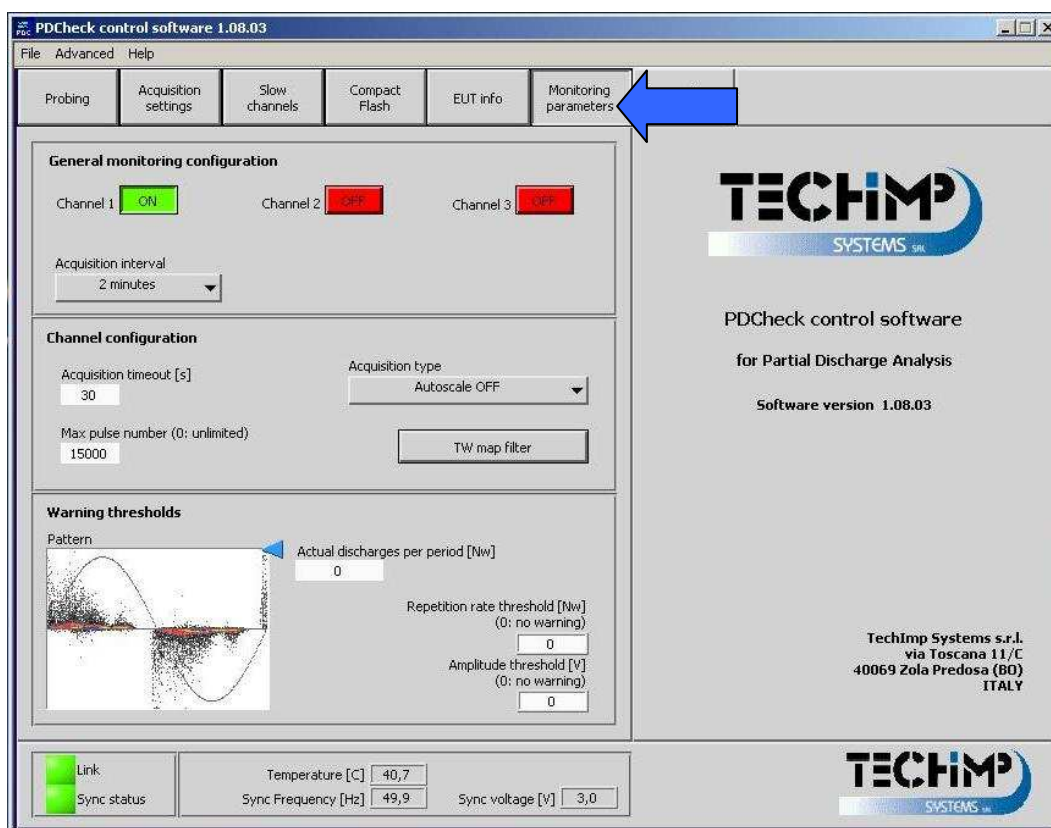


Figura 3.41. Captura de la aplicación “PDCheck Control”, pestaña “Monitoring parameters”.

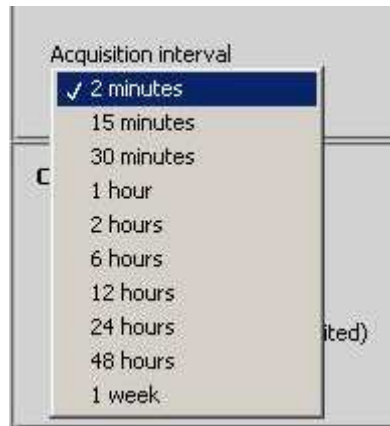


Figura 3.42. Detalle de los diferentes intervalos de adquisición que podemos seleccionar.

El equipo *PDCheck* trae además una novedad a la hora de grabar los datos, ya que tiene incorporada una memoria flash, con capacidad suficiente (aprox. 1GB) para almacenar datos de gran cantidad de monitorizaciones y que como hemos comentado anteriormente, no requiere tener un ordenador encendido para monitorizar. Guarda los datos separándolos en carpetas que ordena con números en hexadecimal y con la fecha y hora de los ensayos. Si existen varias carpetas con la misma fecha significará que hemos cambiado la configuración y por ello separa los datos de las monitorizaciones. Además nos permite descargar las carpetas necesarias a nuestro ordenador, en el caso de que necesitemos realizar un análisis más exhaustivo de los datos mediante *PDProcessing* ó *PDViewer*. A continuación observamos una captura de la aplicación (Figura 3.43).

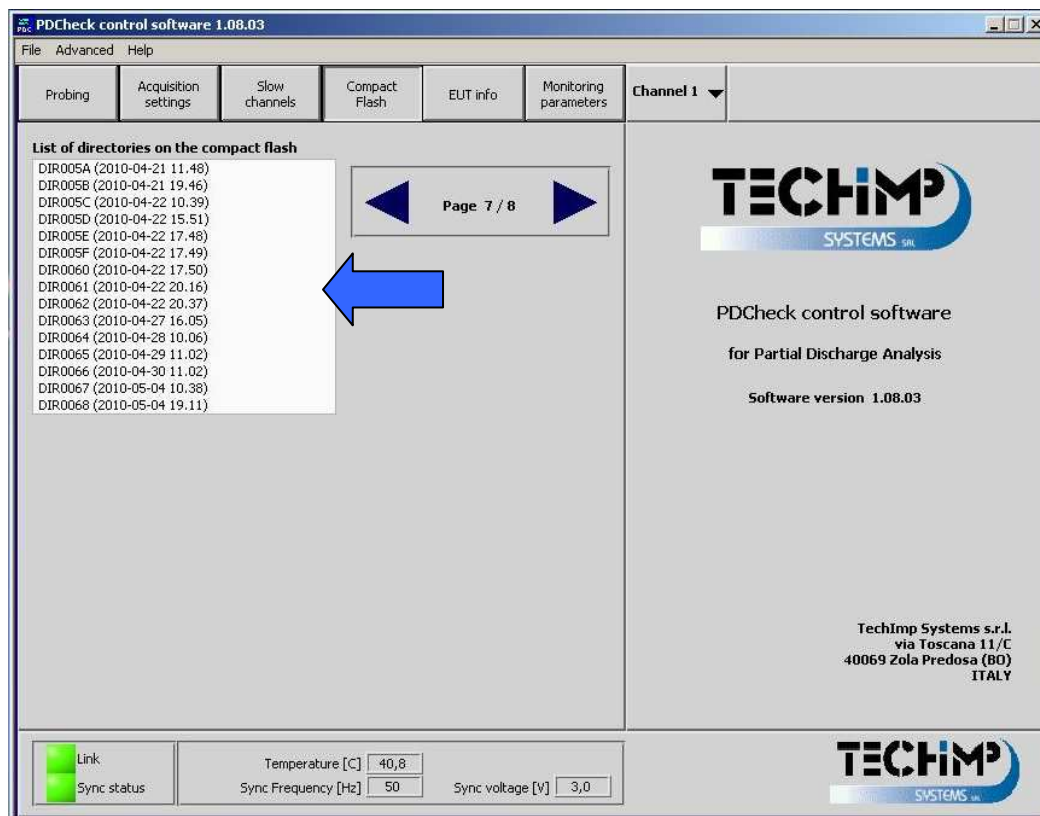


Figura 3.43. Captura de la aplicación “PDCheck Control”, pestaña “Compact flash”.

La siguiente pestaña “EUT info” se utiliza básicamente para organizar los datos adquiridos y formar una base de datos de los diferentes ensayos (Figura 3.44). Podemos introducir todo tipo de información sobre el análisis que realicemos, como el propietario, localización de la planta, tipo de planta, unidad, tipo de aislamiento, voltaje, fabricante, condiciones de operación, etc. y así dejarlo reflejado en los datos para tenerlo en cuenta, en el caso de necesitarlo, a la hora de realizar un informe.

Figura 3.44. Captura de la aplicación “PDCheck Control”, pestaña “EUT info”.

Como podemos observar, es obvio, que el software que controla la monitorización ha avanzado mucho y contiene gran cantidad de mejoras si lo comparamos con el antiguo. Esto puede ser debido al auge en el uso de este tipo de sistemas de análisis y mantenimiento preventivo, que evitan a las empresas muchas pérdidas económicas ante averías imprevistas como por procesos de parada por mantenimiento.

4.- Resultados.

4.1.- Montaje experimental.

Durante la realización de este proyecto, el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III y en concreto el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión (LINEALT), recibió una propuesta consistente en el análisis de tres tipos distintos de hilo de cobre, provenientes de distintos fabricante, mediante un ensayo de envejecimiento por DP. Los tres hilos de las marcas REA, Acebsa y Partzsch son sometidos a este ensayo para medir el tiempo hasta el fallo en varias muestras de cada tipo de hilo, a la vez que se obtienen datos acerca de su comportamiento bajo la actividad de descargas parciales.

Los ensayos realizados tratan de evaluar la fiabilidad de los hilos de cobre al ataque por DP, analizando su resistencia a las DP, por lo que se midieron los tiempos hasta fallo en los tres tipos de muestra. Para conseguir mayor fiabilidad estadística de los datos obtenidos, se analizaron varias muestras de cada tipo de hilo de cobre; su número fue mayor conforme la dispersión de los tiempos hasta fallo creció. Nuestro circuito para el ensayo es de tipo indirecto (Figura 4.1), alimentado mediante una fuente de alimentación “Trek” que se conecta a un generador de funciones para controlar la forma de onda y la frecuencia, y nos proporciona la onda sinusoidal de tensión necesaria para realizar los test. Los ensayos se realizaron a 1250Vef y 500Hz de frecuencia sinusoidal para tratar de acelerar el proceso de envejecimiento que pueda ocurrir en la muestra a una frecuencia normal de funcionamiento de 50Hz, lo que provoca un estrés eléctrico mayor del normal. Esa tensión sería aplicada a cada muestra de hilo de cobre en forma de par trenzado (Figuras 4.2 y 4.3). Un hilo se conecta a tensión y el otro a tierra, para así comprobar el tiempo hasta fallo del recubrimiento aislante del hilo de cobre, y que evita la conexión eléctrica de los dos hilos.

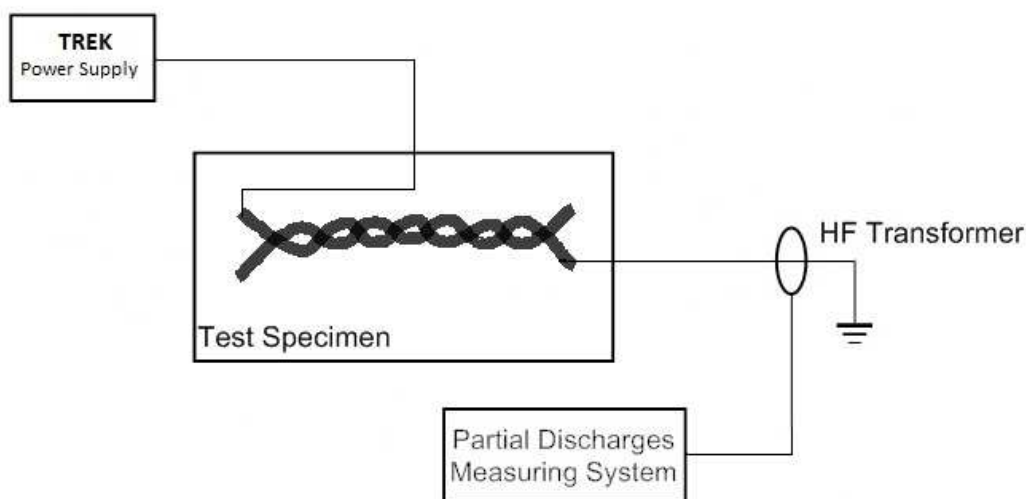


Figura 4.1 Esquema de circuito indirecto utilizado para el ensayo.



Figura 4.2 Imagen de par trenzado de hilo REA que se utiliza en los ensayos.



Figura 4.3 Detalle del par trenzado de hilo de cobre REA tras finalizar el ensayo, donde se puede observar el polvo blanco causado por el envejecimiento del recubrimiento semiconductor.

Con objeto de medir los tiempos hasta fallo se utilizó el sistema de monitorización de *PDBase* para hacer adquisiciones programadas cada 10min para las primeras horas de ensayo y posteriormente en intervalos de 30min hasta su ruptura final; de esta manera se pueden obtener suficientes datos en el caso de que se produjera una ruptura prematura del material. Cuando una muestra resultaba dañada en su aislamiento, saltaba la protección eléctrica del laboratorio y el patrón de DP no mostraba evento alguno detectado. En este proyecto de fin de carrera se aprovecharon los patrones detectados durante el proceso de envejecimiento para analizar los parámetros estadísticos más representativos de la detección de DP conforme el tiempo de envejecimiento era mayor. En las siguientes secciones se muestran los resultados de los ensayos obtenidos, y se analizan los datos sin tener en cuenta las primeras

adquisiciones que se consideran no significativas por el fenómeno del “acondicionamiento de la actividad de DP” (disminución de la actividad y de la magnitud de las descargas parciales hasta la estabilización de la carga espacial acumulada en las interfaces de dieléctrico) observado en los primeros minutos de la adquisición de DP ([Stone, 2004]). Éste fenómeno que se observa con gran claridad en muchas de las muestras analizadas. Se considera que el acondicionamiento de la actividad de DP se produce en aproximadamente 30 minutos, por lo que sólo las adquisiciones posteriores deben ser consideradas en este análisis.

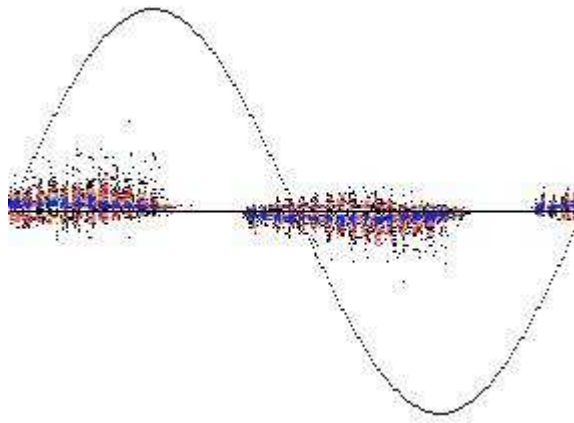


Figura 4.4 Captura de patrón de Descargas Parciales en una muestra de hilo de cobre REA.

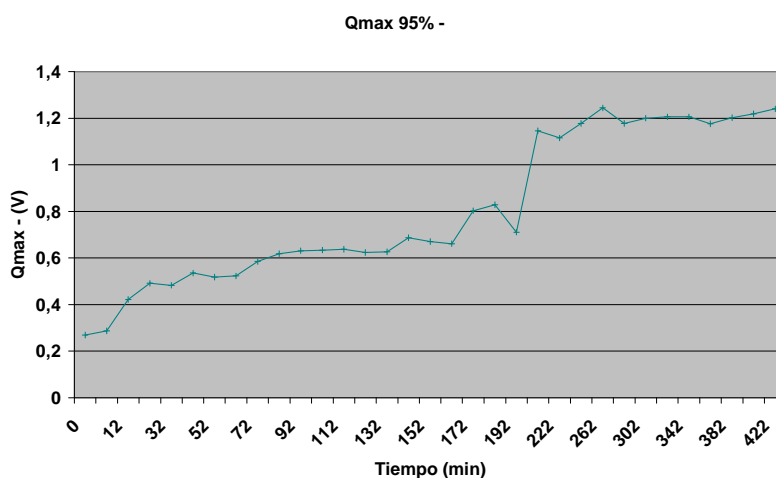
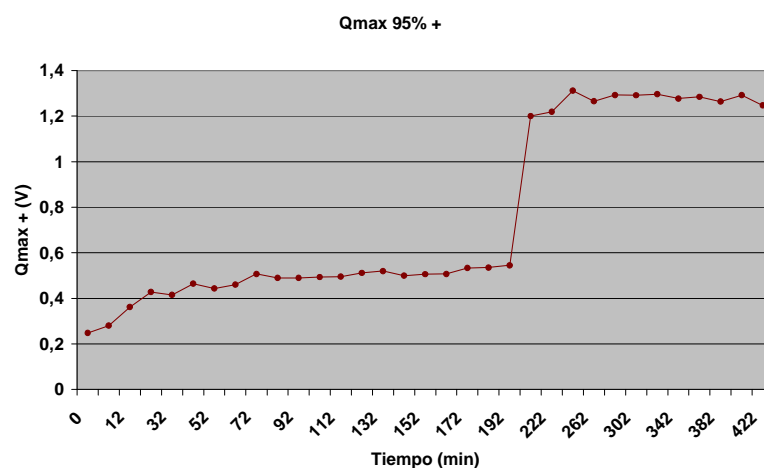
4.2.- Resultados de Q_{max} 95%.

Tal y como se indicó en la sección 2.4, este parámetro es la representación estadística de la carga máxima detectada en cada adquisición de descargas parciales durante el proceso de monitorización.

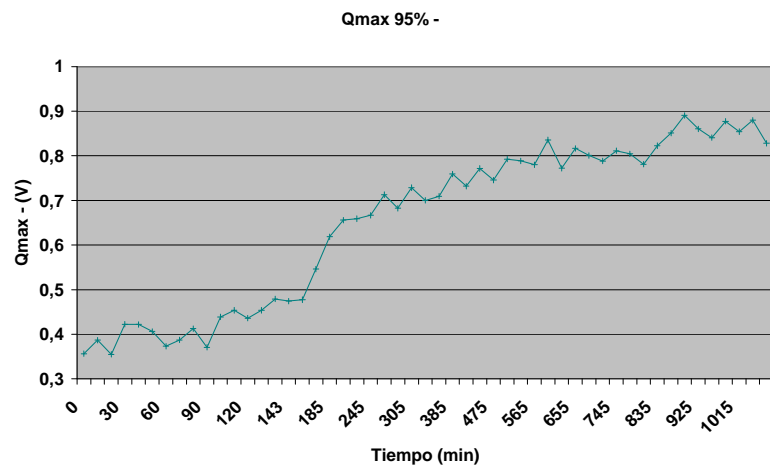
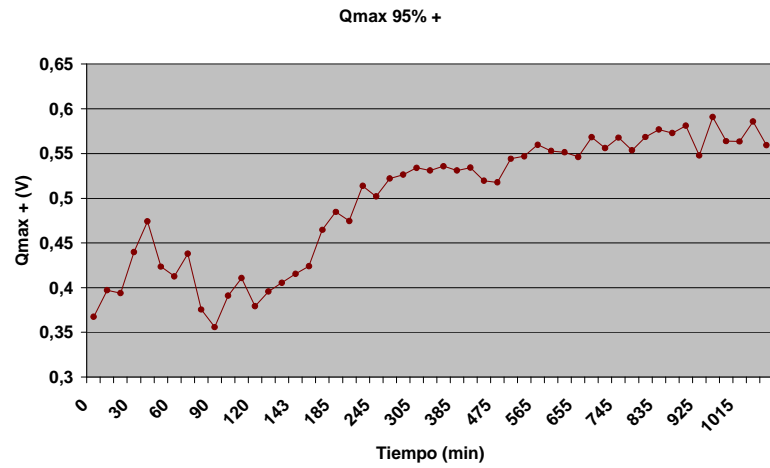
4.2.1.- Q_{max} 95% de hilo Acebsa.

Disponemos de 5 muestras del hilo de cobre Acebsa, y en los resultados obtenidos todas presentan una tendencia creciente para el parámetro Q_{max} 95%, ya sea para las descargas de polaridad positiva, como para las negativas. Las muestras 2 y 5 son las que presentan una tendencia claramente creciente en comparación con las demás. Deducimos que conforme avanza el envejecimiento del material, debido al ensayo de DP, esta magnitud crece. Además, se observa que todas las muestras han soportado gran cantidad de horas de ensayo, sobrepasando la primera en fallar las 7 horas, y llegando incluso alguna a soportar 28 horas.

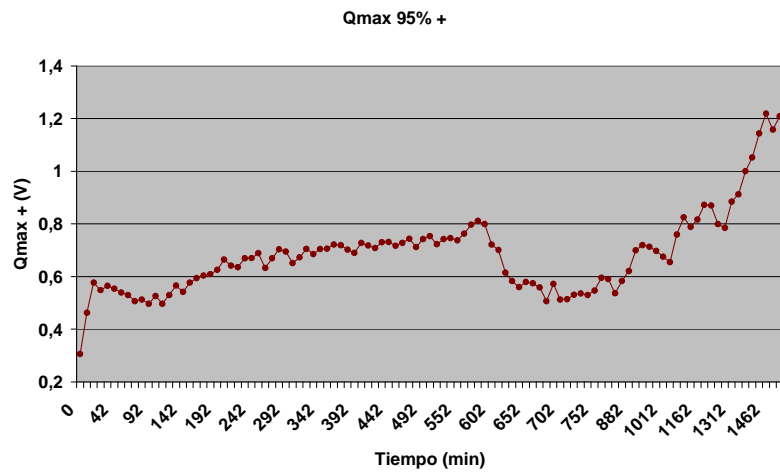
Muestra Acebsa 1

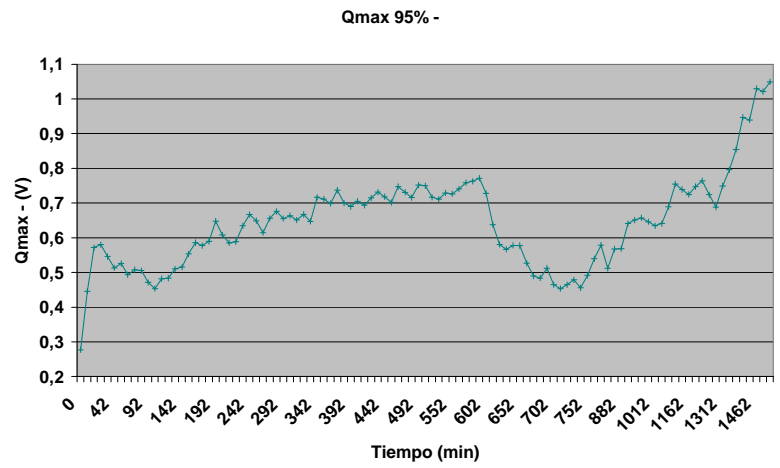


Muestra Acebsa 2

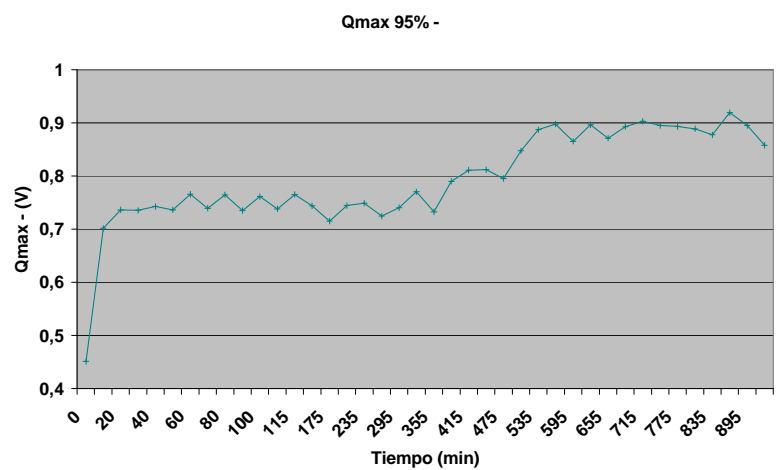
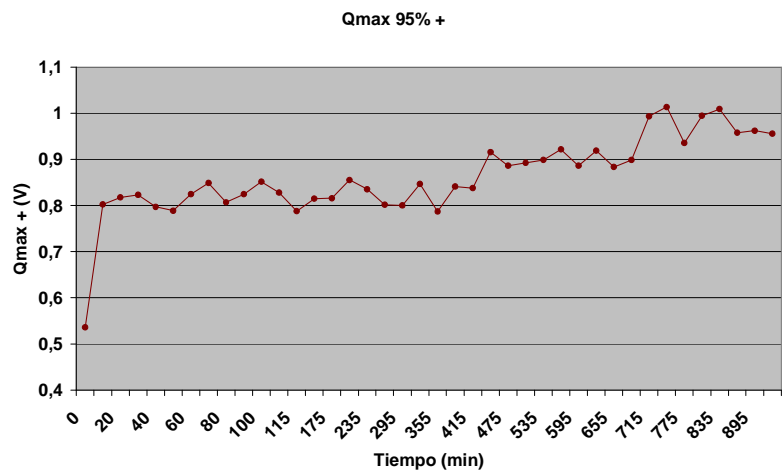


Muestra Acebsa 3

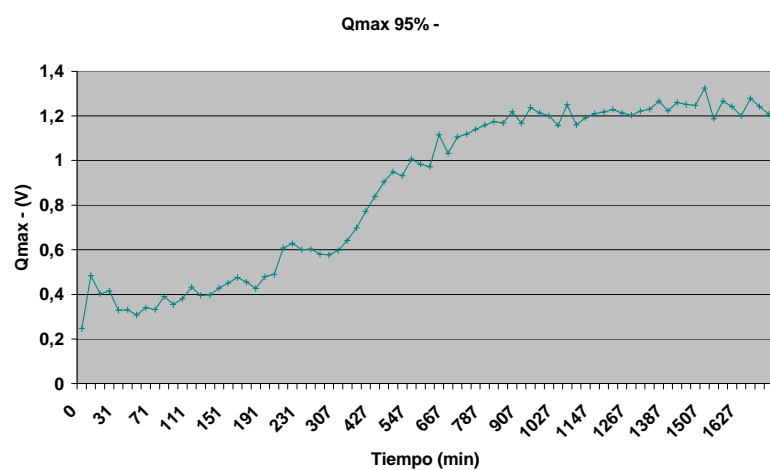
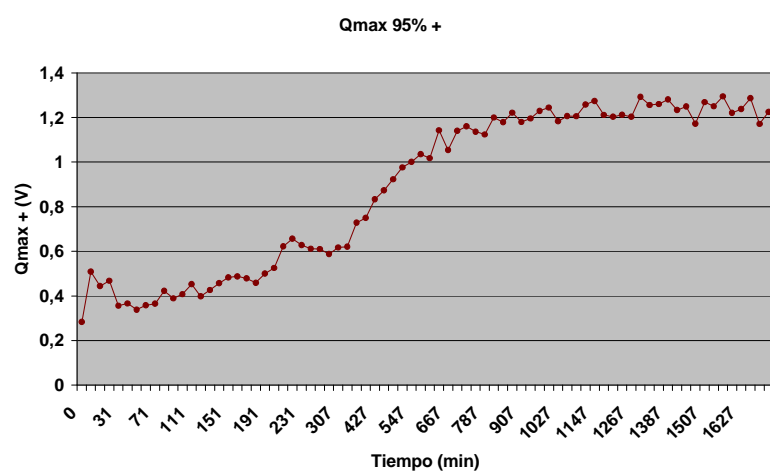




Muestra Acebsa 4



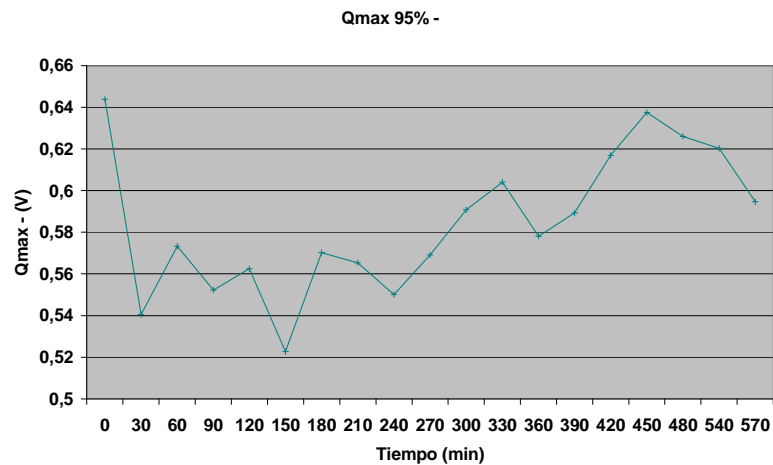
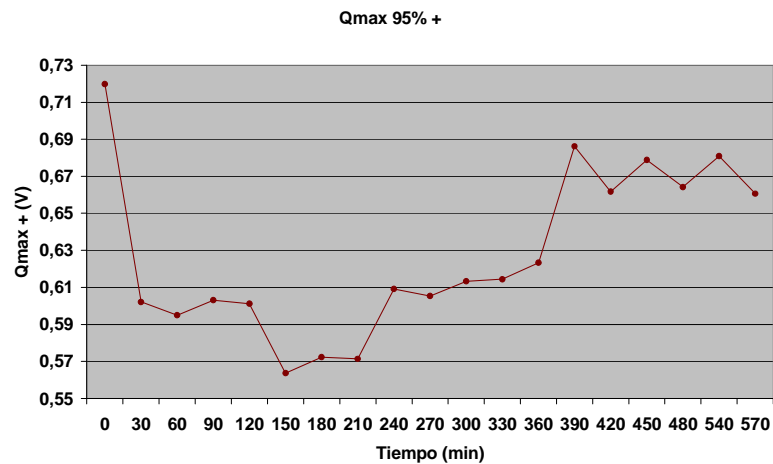
Muestra Acebsa 5



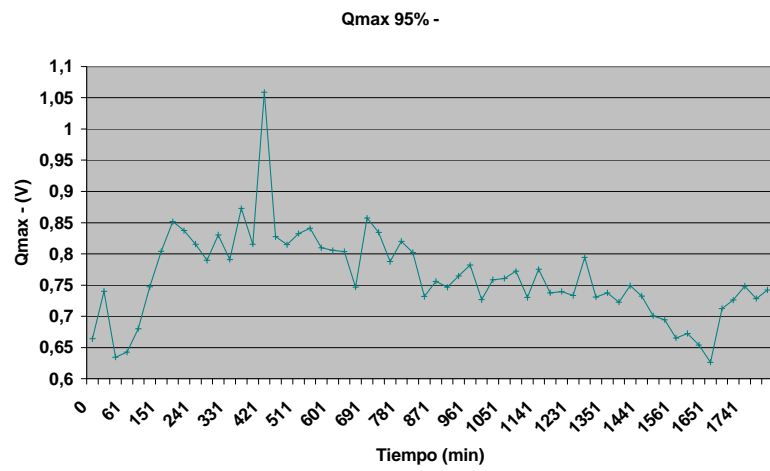
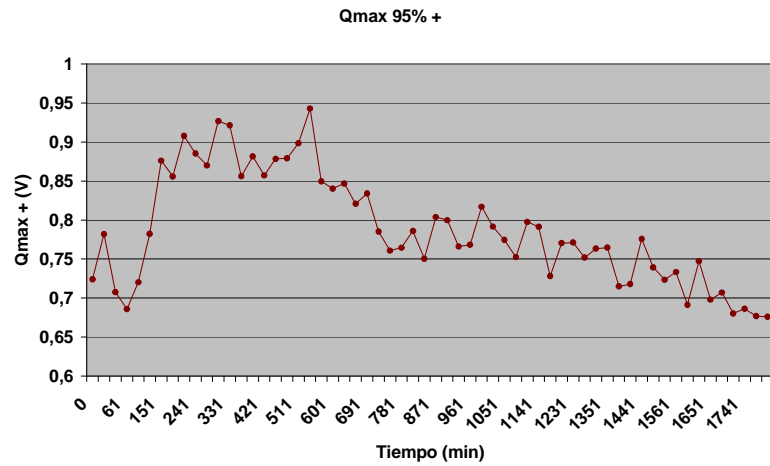
4.2.2.- Q_{max} 95% de hilo REA.

En las siguientes gráficas puede observarse que, para tiempos de envejecimiento superiores a 30min, de las 13 muestras de hilo de cobre REA, 11 presentan una tendencia claramente creciente para Q_{max} 95% tanto para descargas positivas como negativas. Las muestras 2 y 5 muestran una tendencia mucho más errática. Se puede decir que el 85% de las muestras indican su envejecimiento mediante este parámetro.

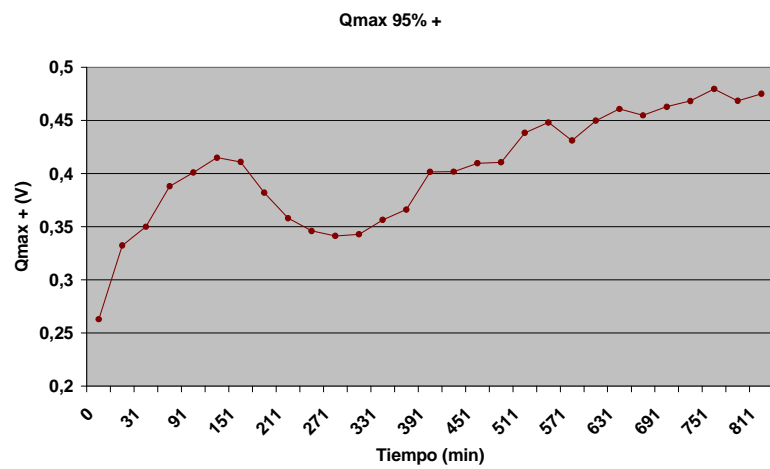
Muestra REA 1

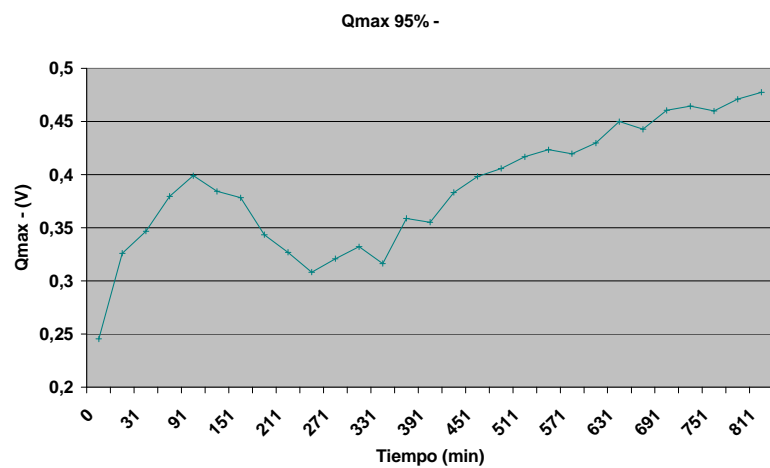


Muestra REA 2

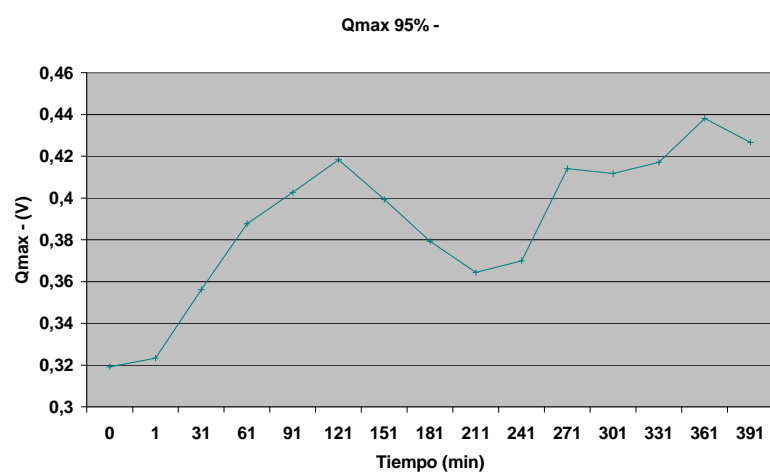
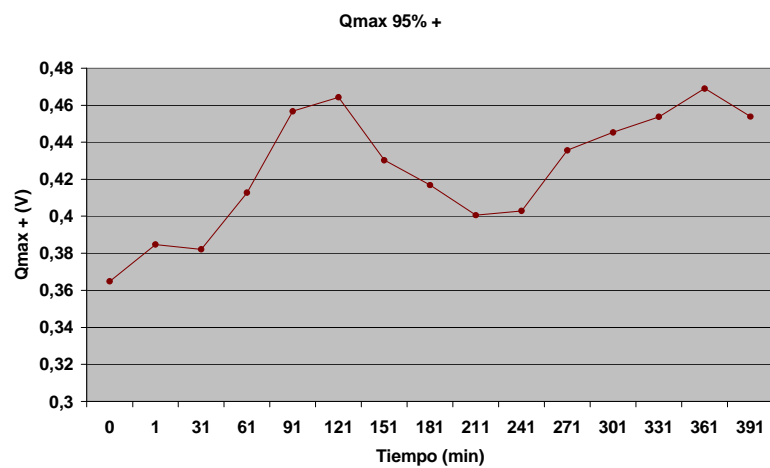


Muestra REA 3

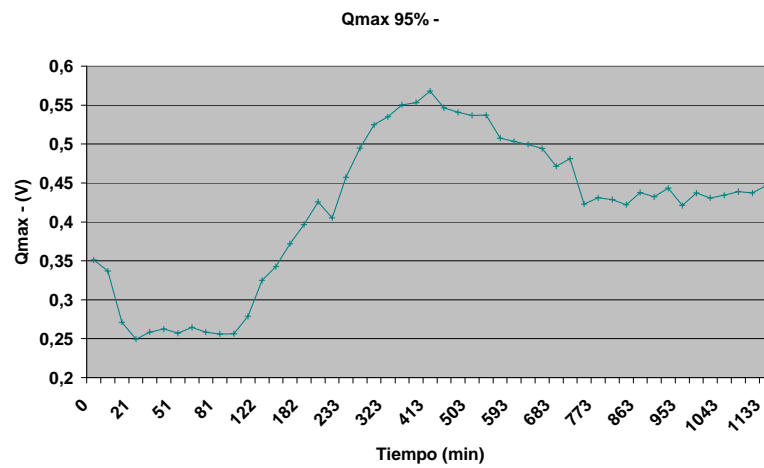
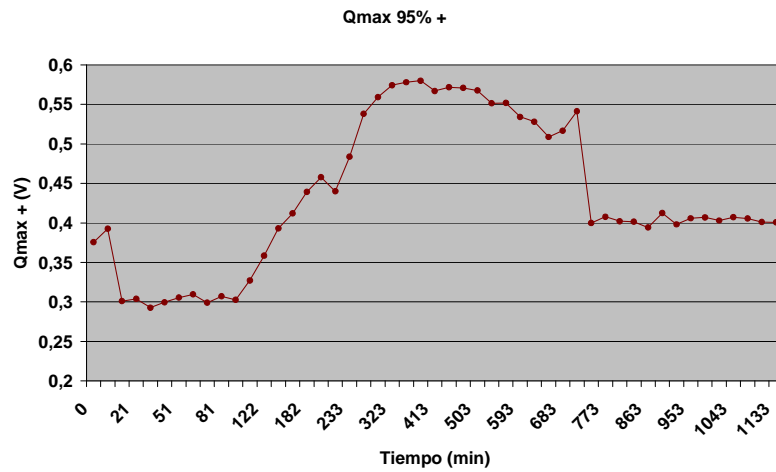




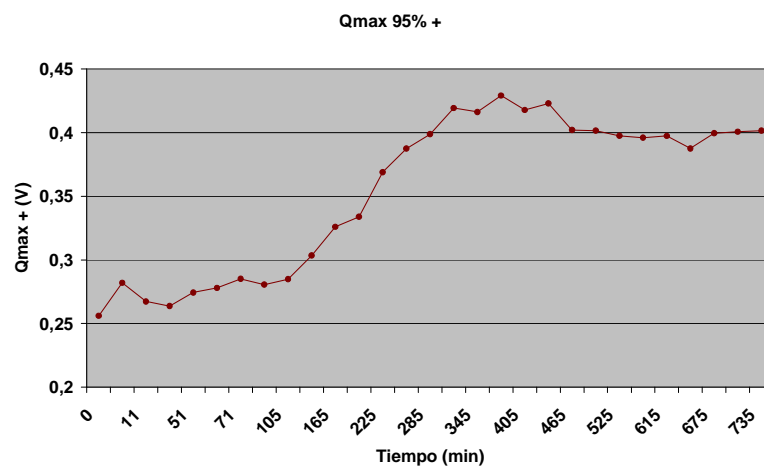
Muestra REA 4

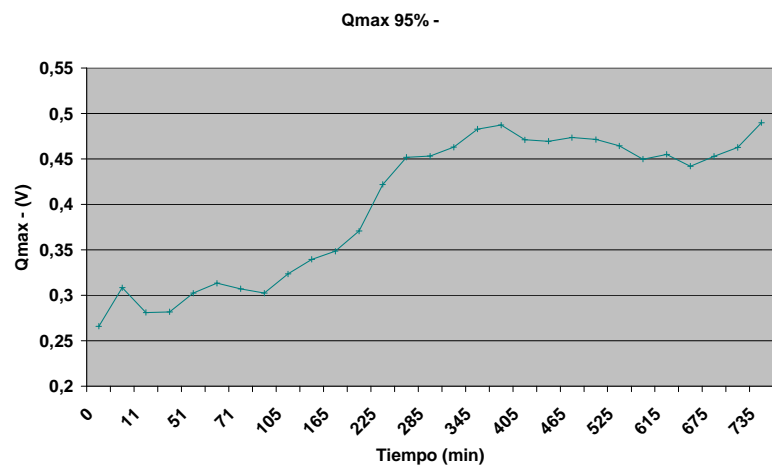


Muestra REA 5

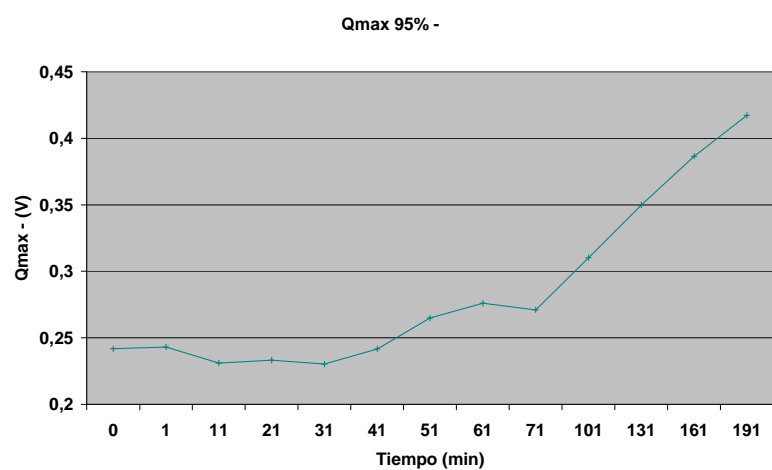
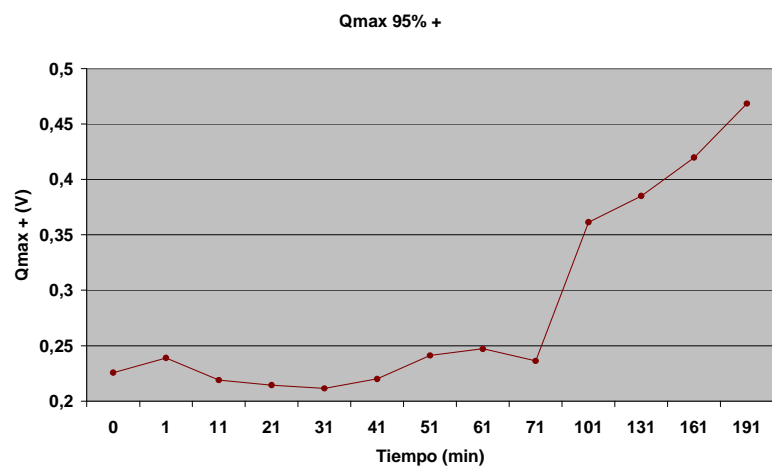


Muestra REA 6

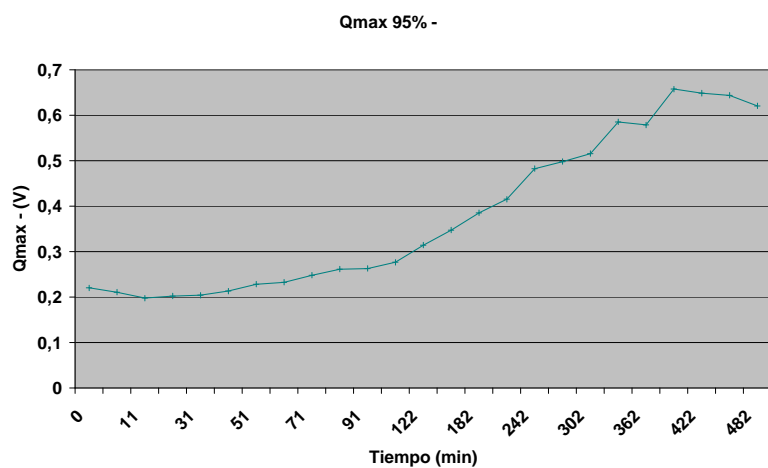
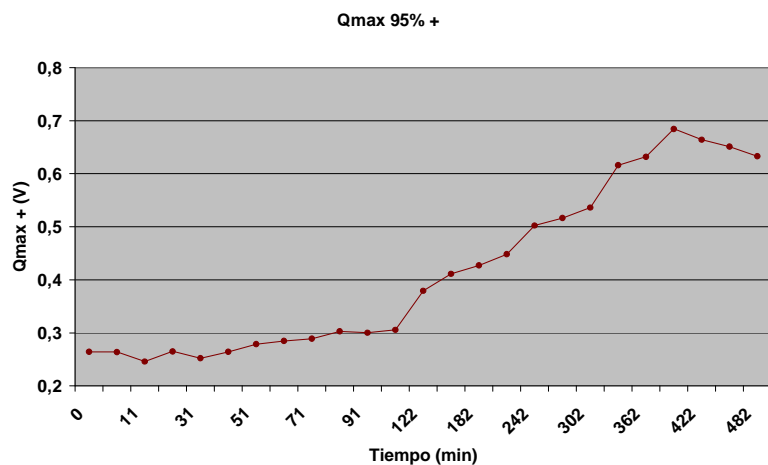




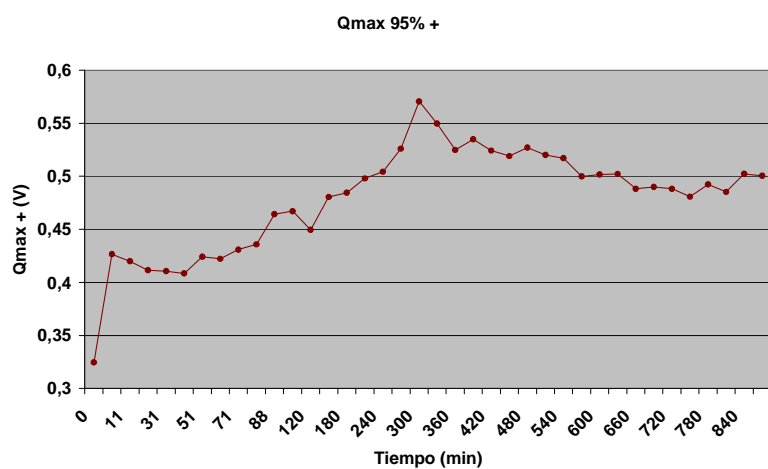
Muestra REA 7

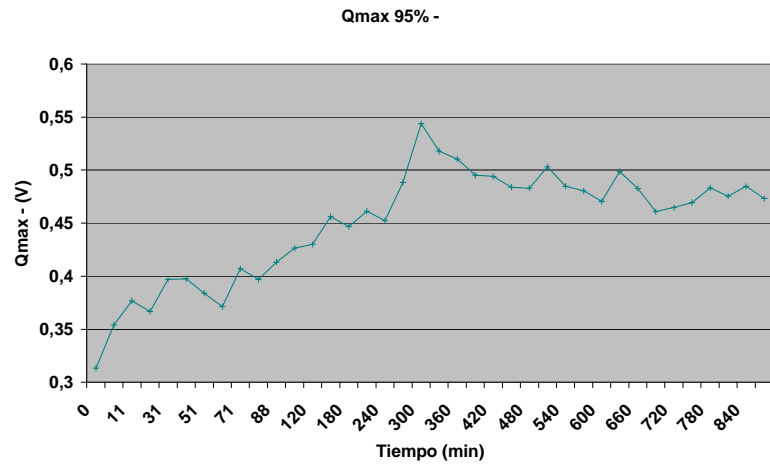


Muestra REA 8

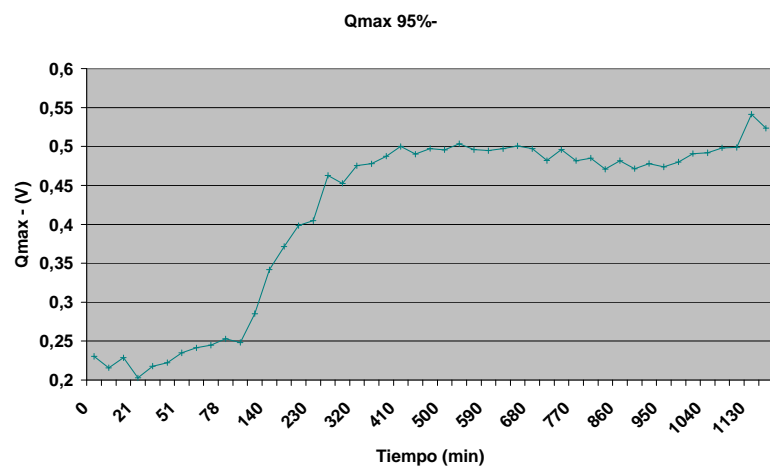
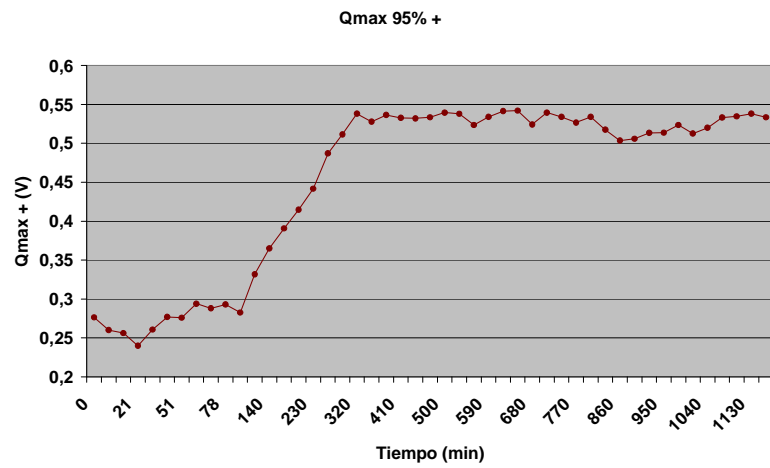


Muestra REA 9

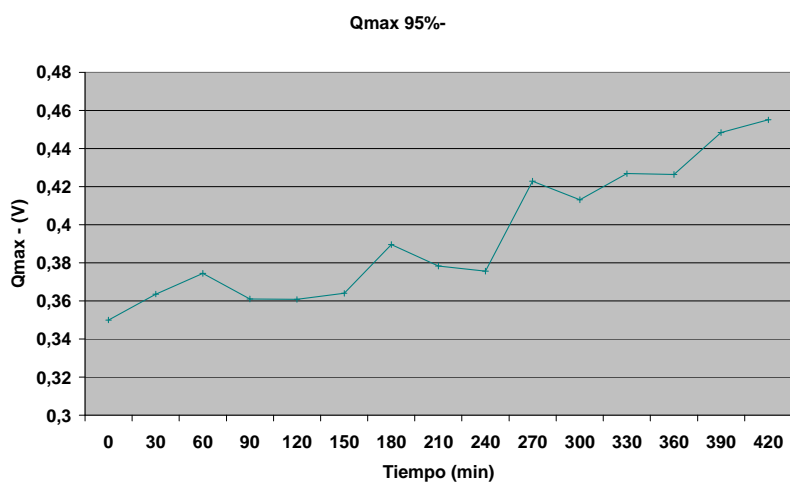
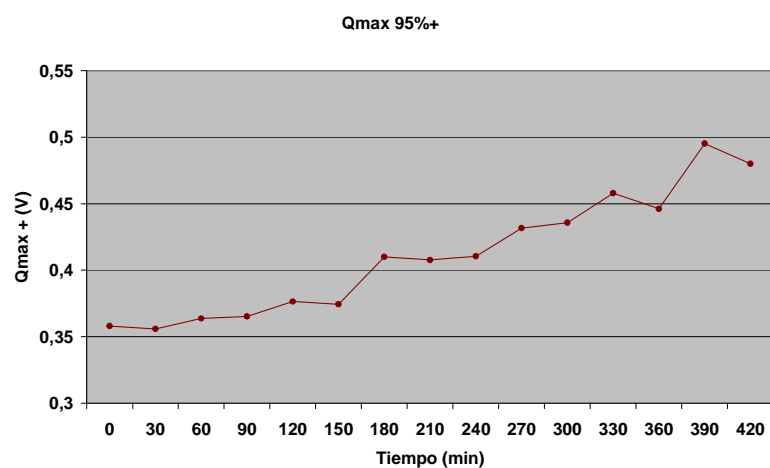




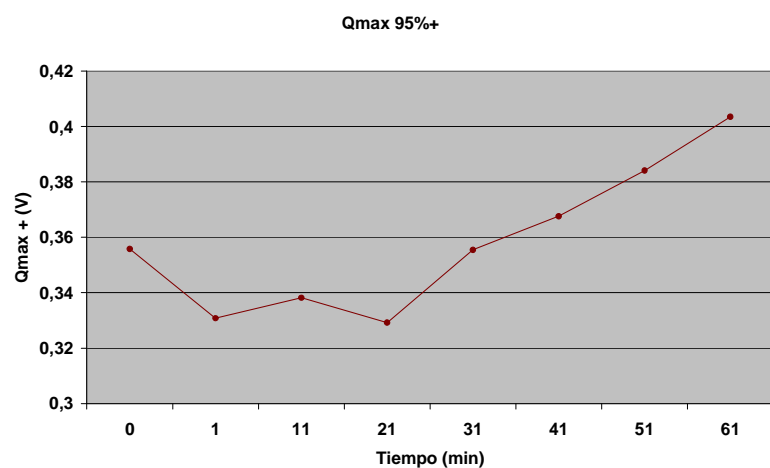
Muestra REA 10

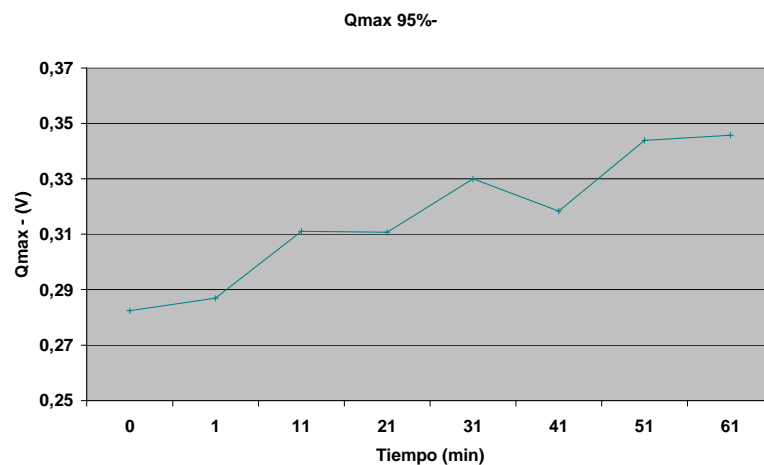


Muestra REA 11

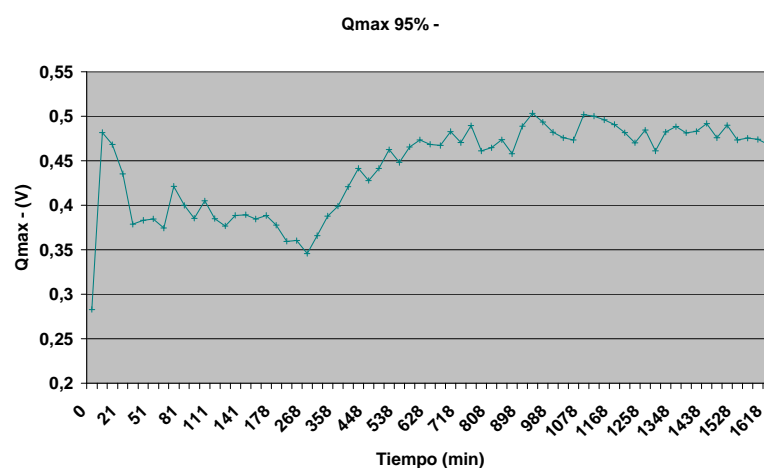
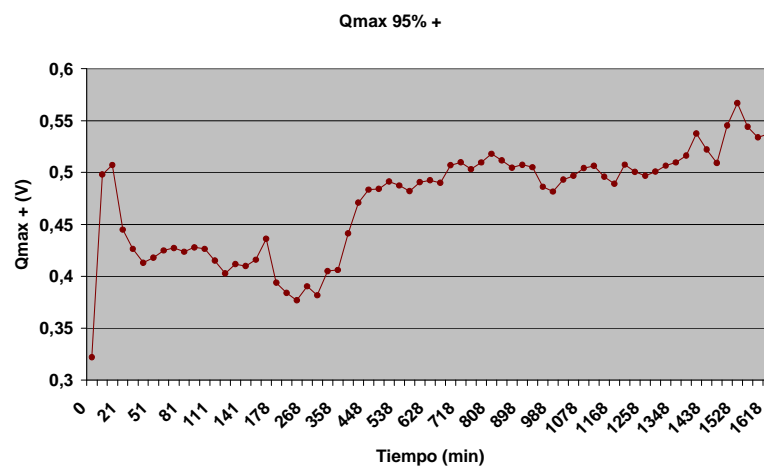


Muestra REA 12





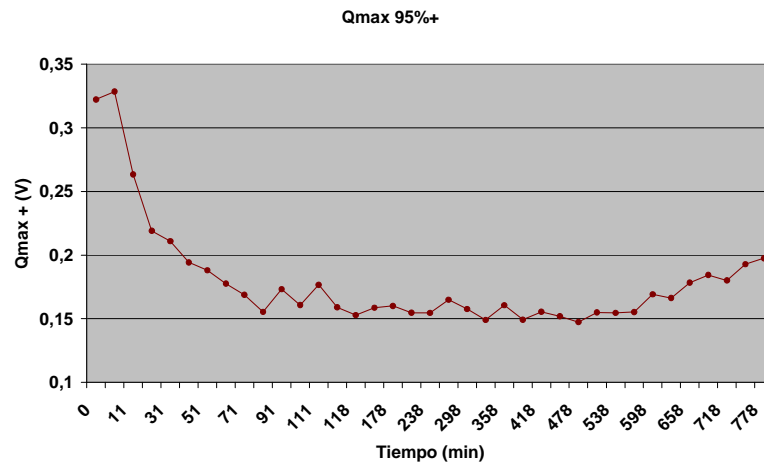
Muestra REA 13



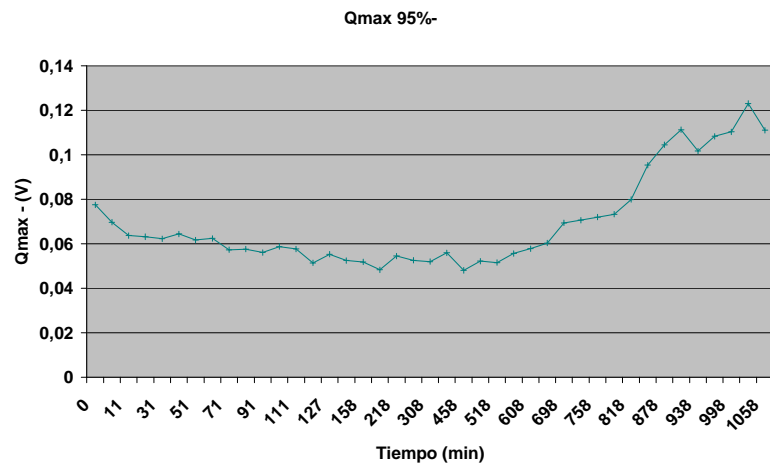
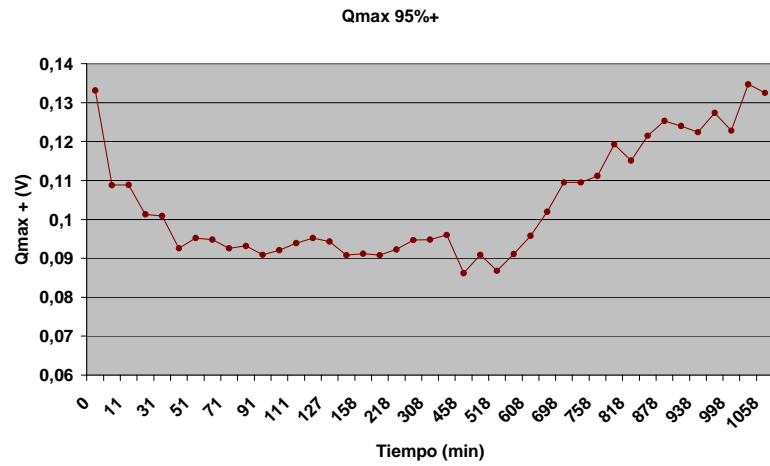
4.2.3.- Q_{max} 95% de hilo Partzsch.

Disponemos de 6 muestras del hilo de cobre Partzsch de las cuales únicamente las muestras 2,4 y 5 presentan una tendencia creciente para Q_{max} 95%. Aunque como podemos observar, la tendencia no es muy marcada. El tiempo mínimo hasta el fallo es de 8 horas.

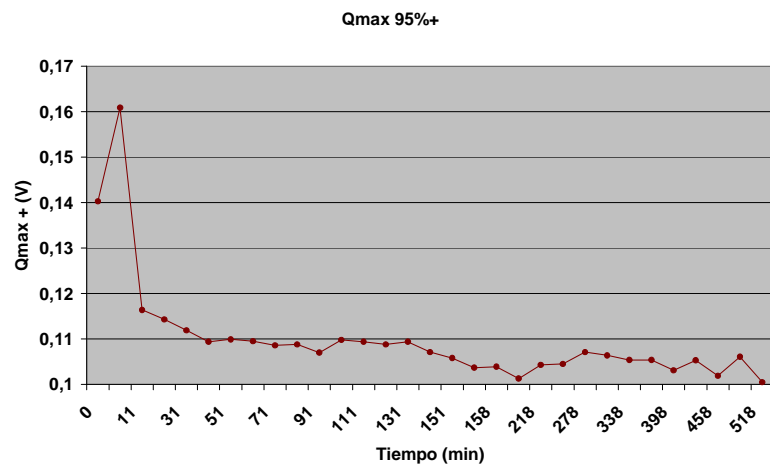
Muestra Partzsch 1

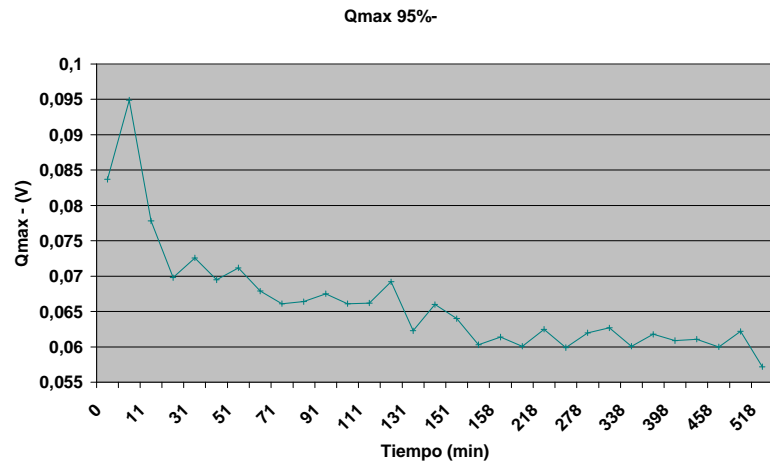


Muestra Partzsch 2

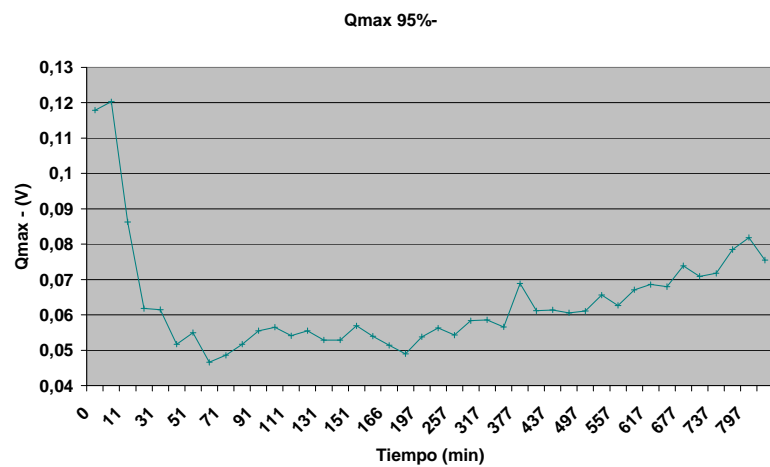
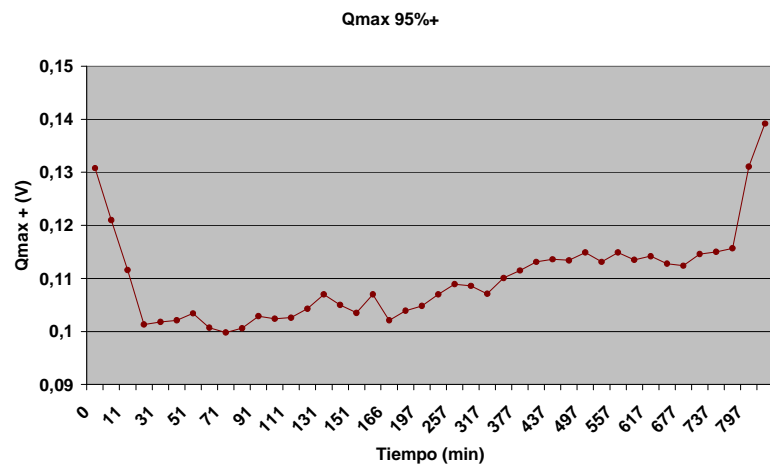


Muestra Partzsch 3

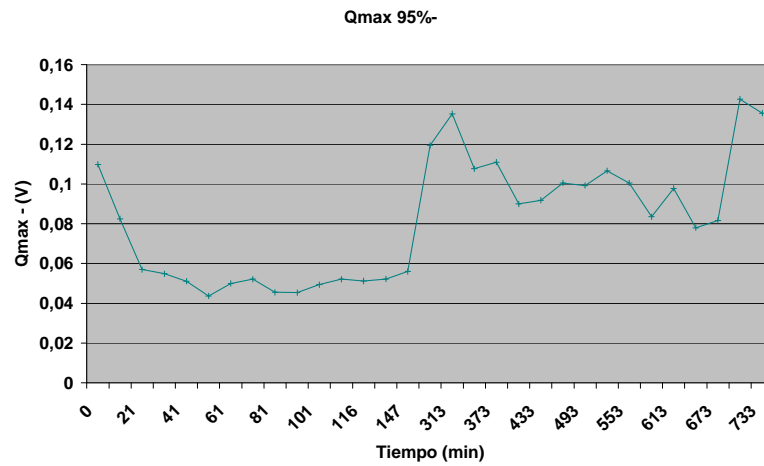
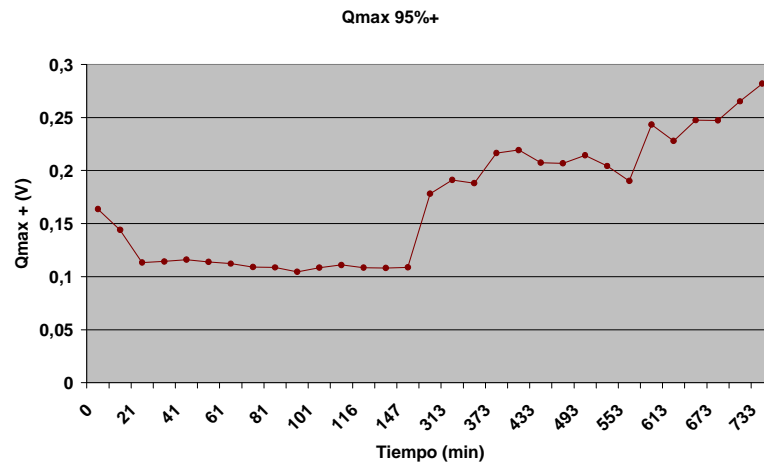




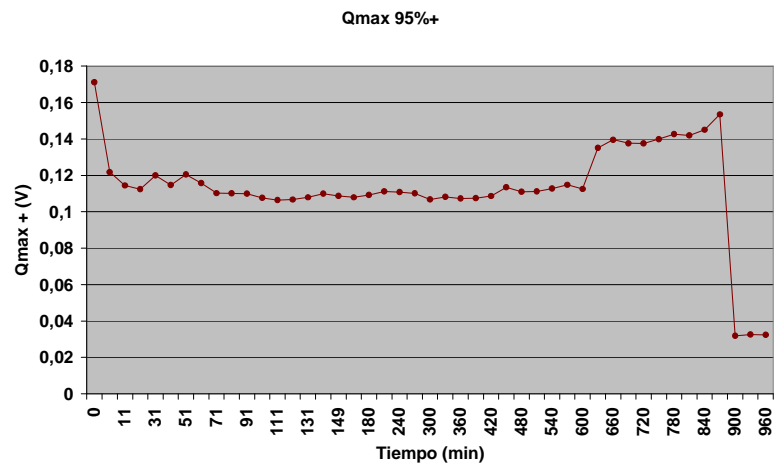
Muestra Partzsch 4

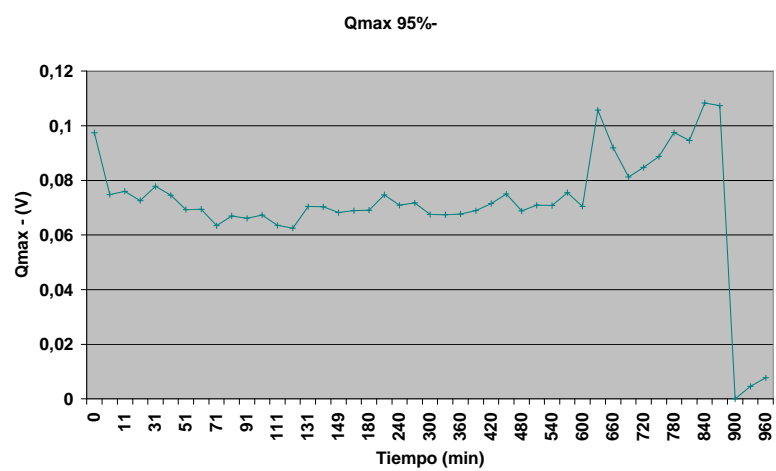


Muestra Partzsch 5



Muestra Partzsch 6





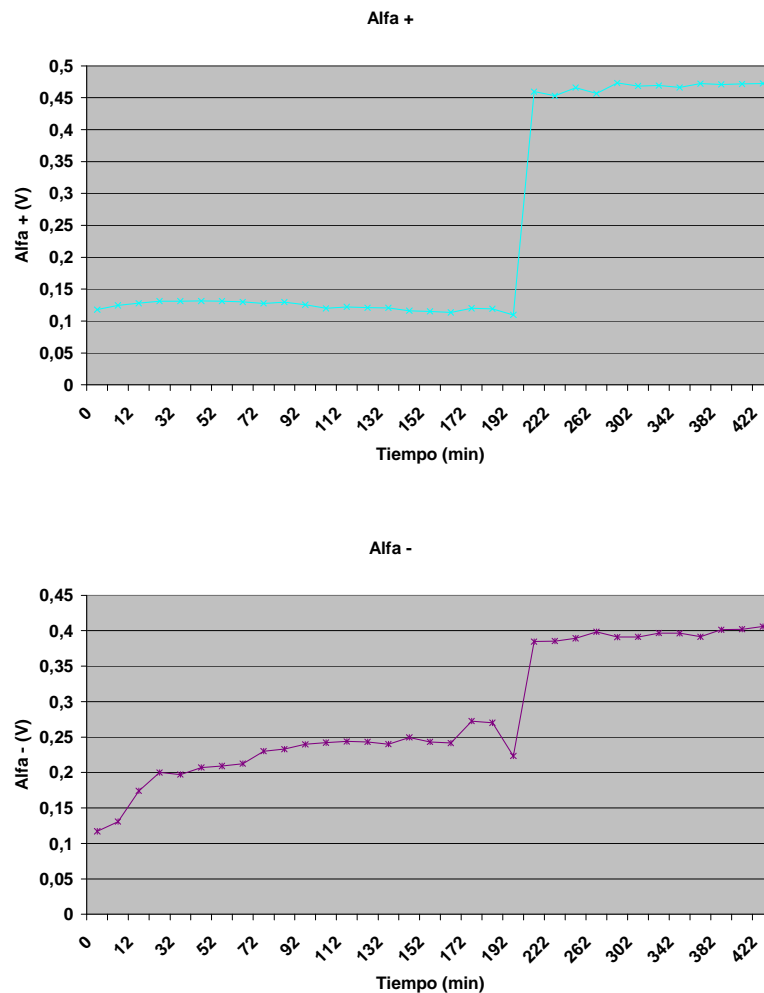
4.3.- Resultados de Alfa.

En las siguientes figuras se muestra la evolución del parámetro que mide la media estadística de las DP's adquiridas en el proceso de monitorización empleando distribuciones de Weibull.

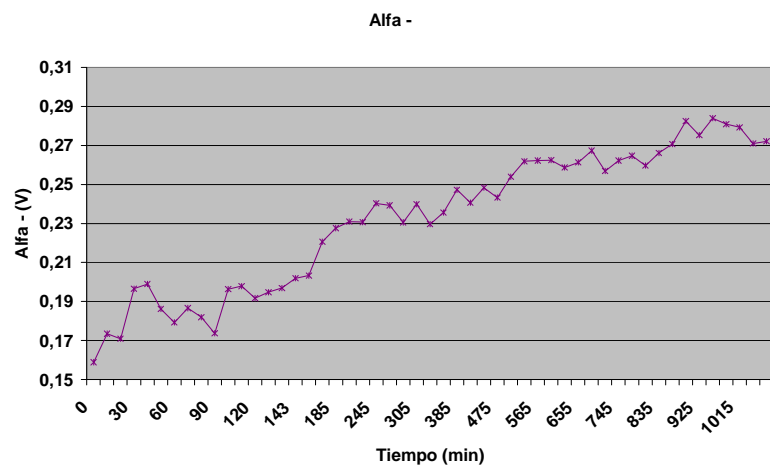
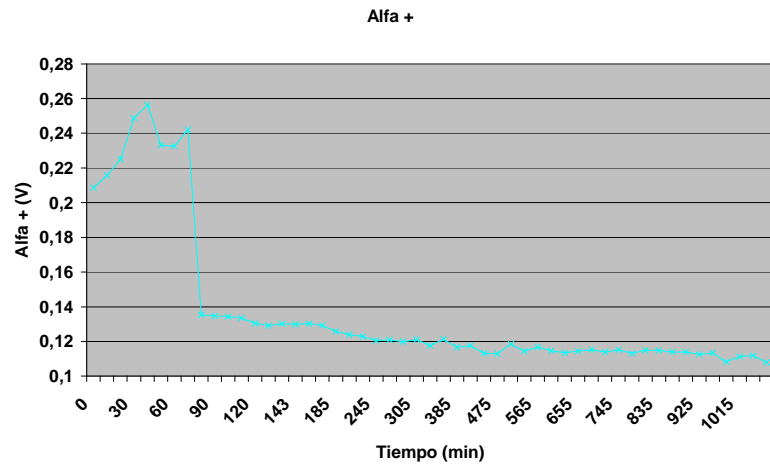
4.3.1.- Alfa de hilo Acebsa.

De las 5 muestras del hilo de cobre Acebsa de las que disponemos, 3 muestras presentan un marcado crecimiento del parámetro *Alfa* tanto para valores positivos como negativos. Además, en la muestra 2, solamente las descargas de polaridad negativa muestran un carácter claramente creciente. Aunque la muestra 3 no presenta un crecimiento del parámetro durante todo el proceso de envejecimiento, cabe indicar que los últimos 700min (la mitad de su vida útil) sufre un aumento claro de esta magnitud.

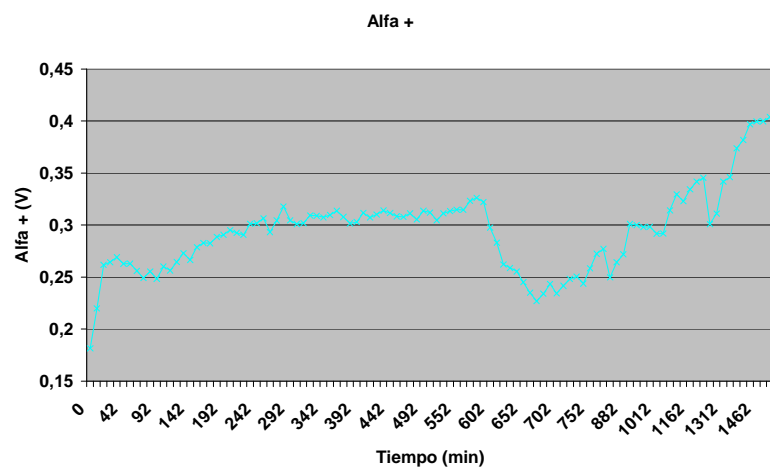
Muestra Acebsa 1

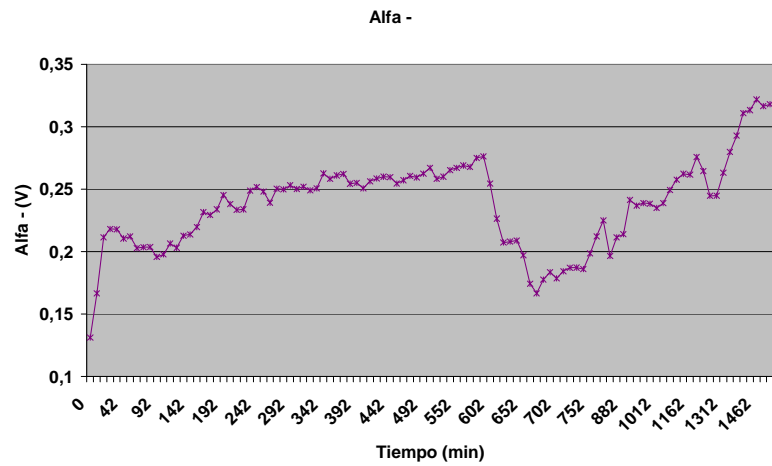


Muestra Acebsa 2

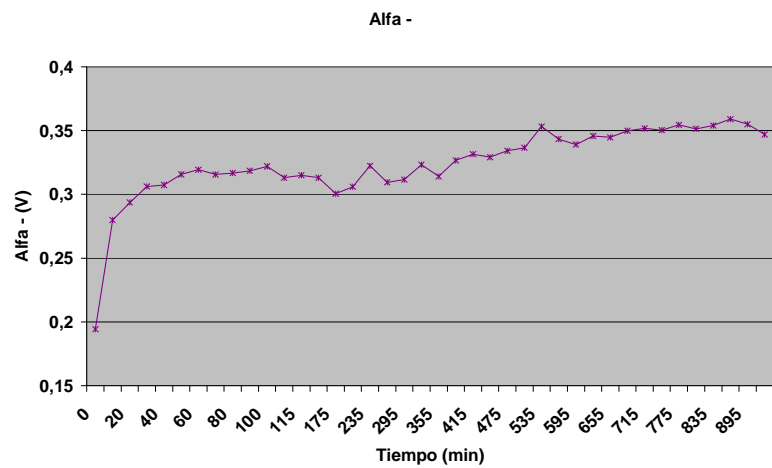
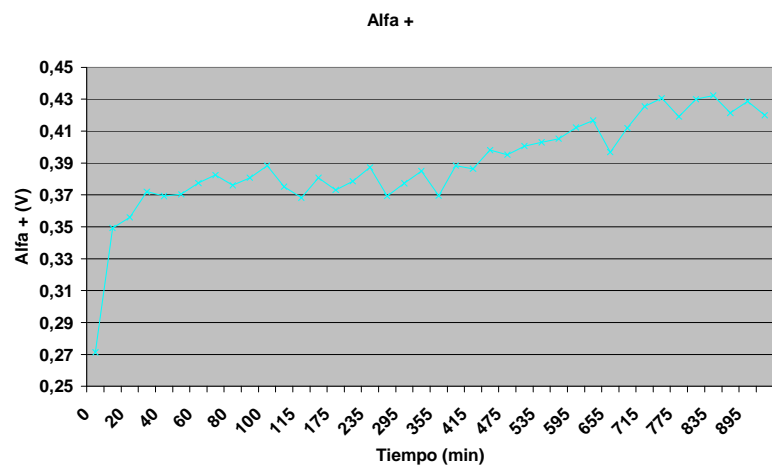


Muestra Acebsa 3

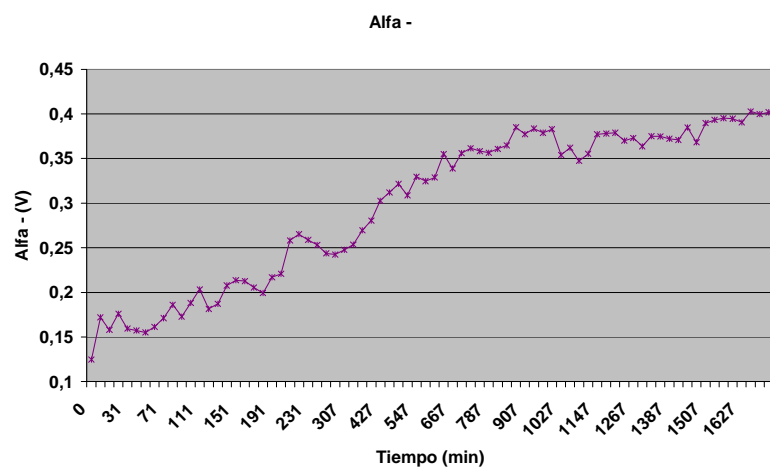
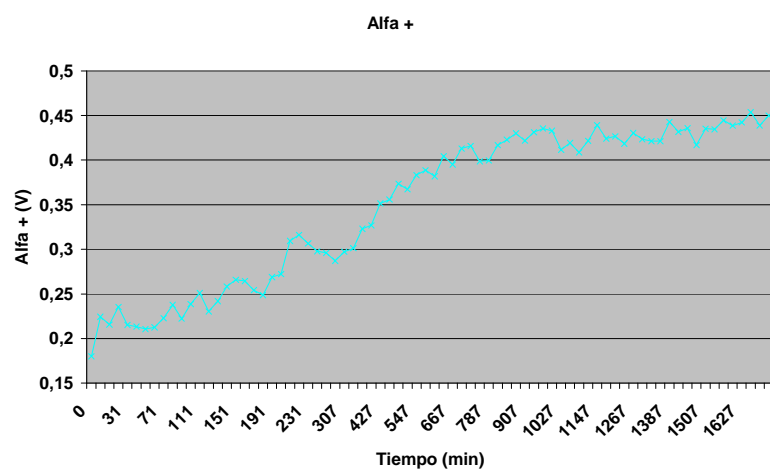




Muestra Acebsa 4



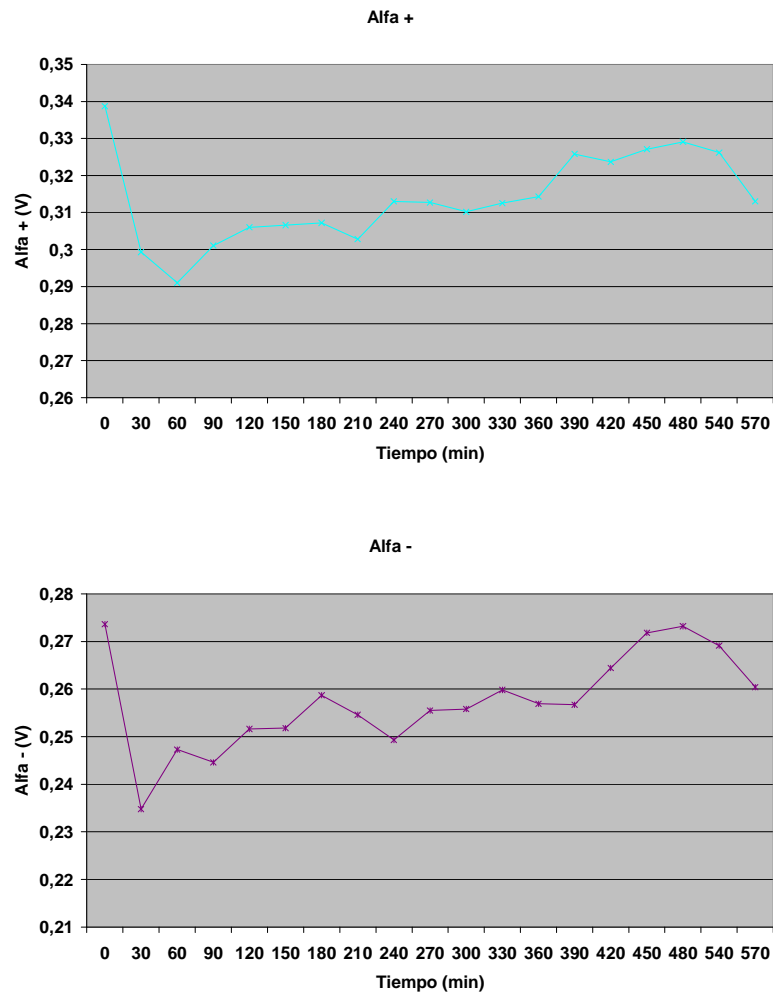
Muestra Acebsa 5



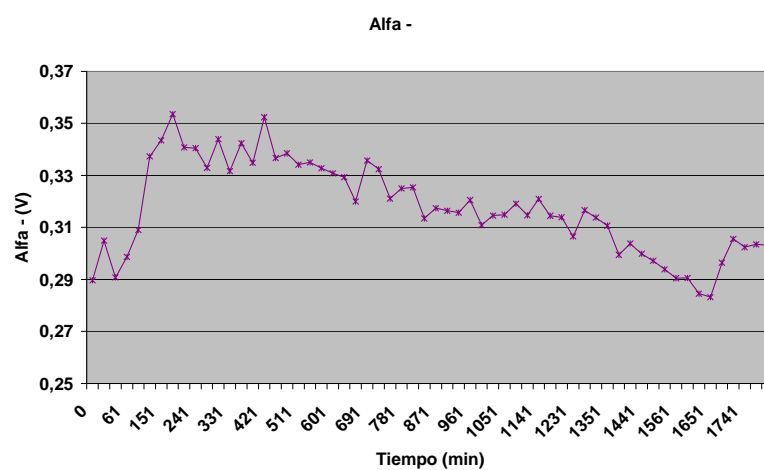
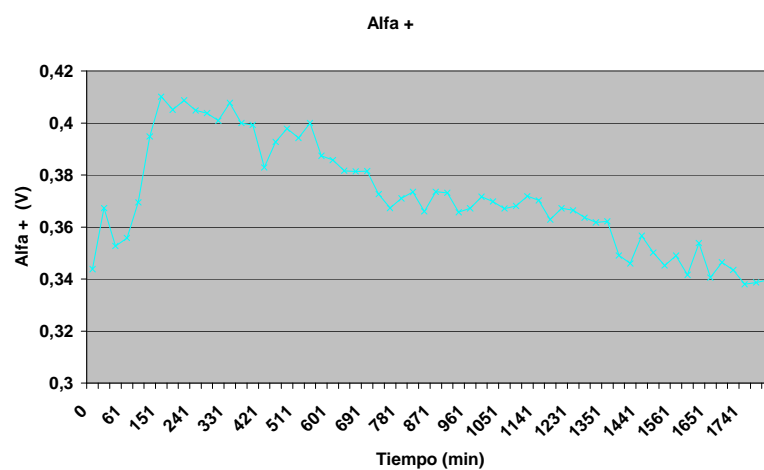
4.3.2.- Alfa de hilo REA

Disponemos de 13 muestras del hilo de cobre REA, y en los resultados obtenidos, 10 presentan una tendencia creciente para el parámetro *Alfa*. Como podemos observar en las gráficas, el tiempo hasta fallo de este hilo es bastante elevado en la mayoría de las muestras.

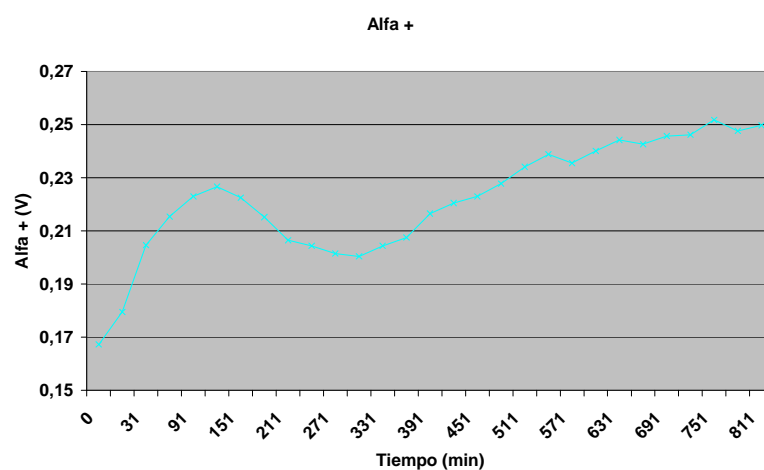
Muestra REA 1

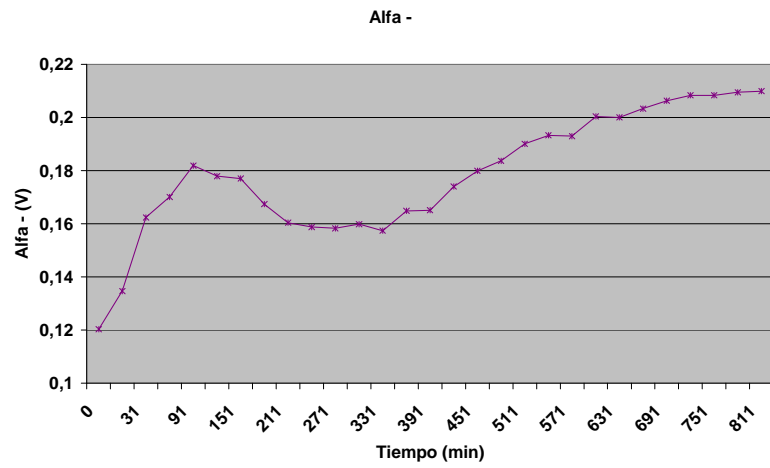


Muestra REA 2

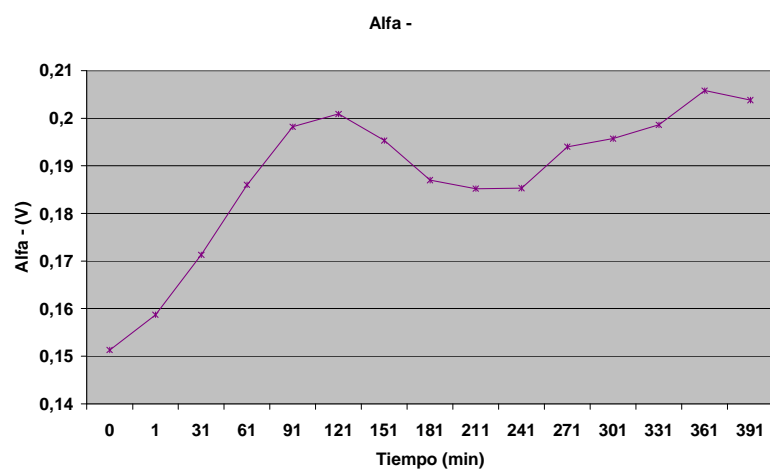
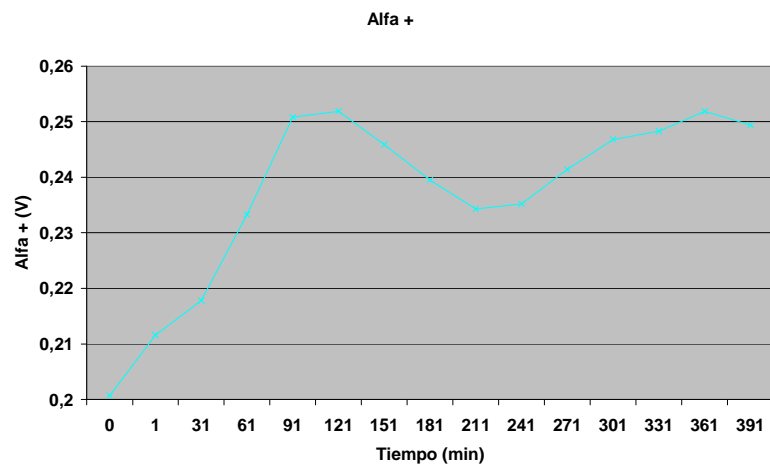


Muestra REA 3

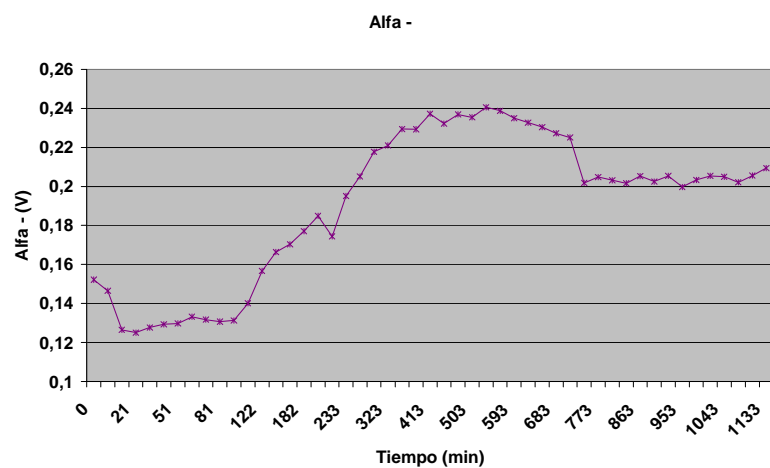
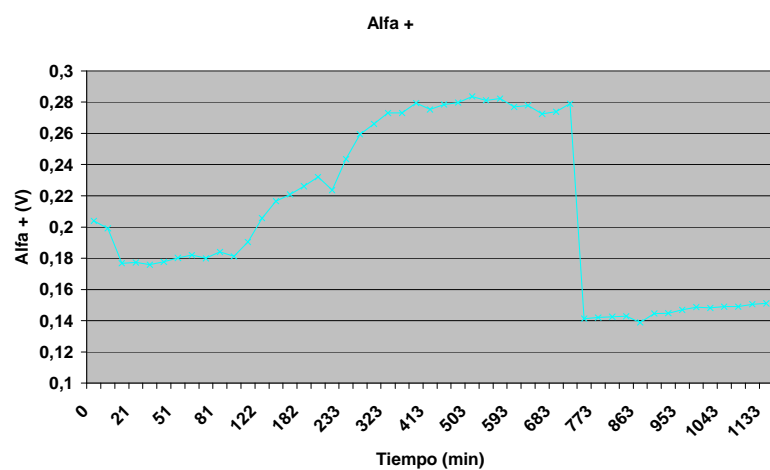




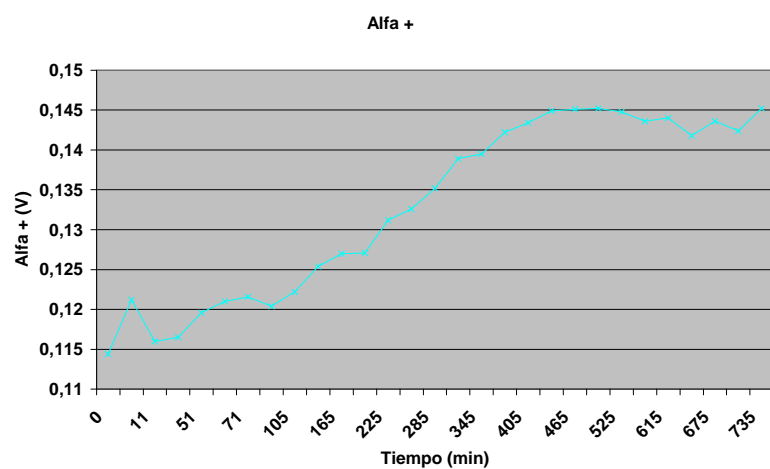
Muestra REA 4

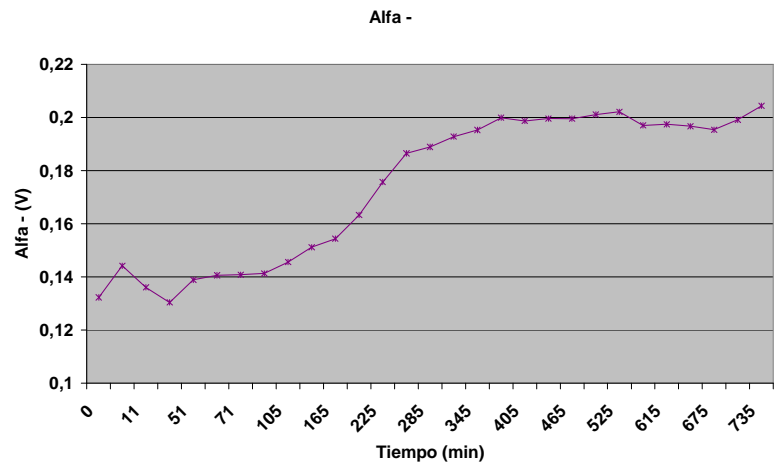


Muestra REA 5

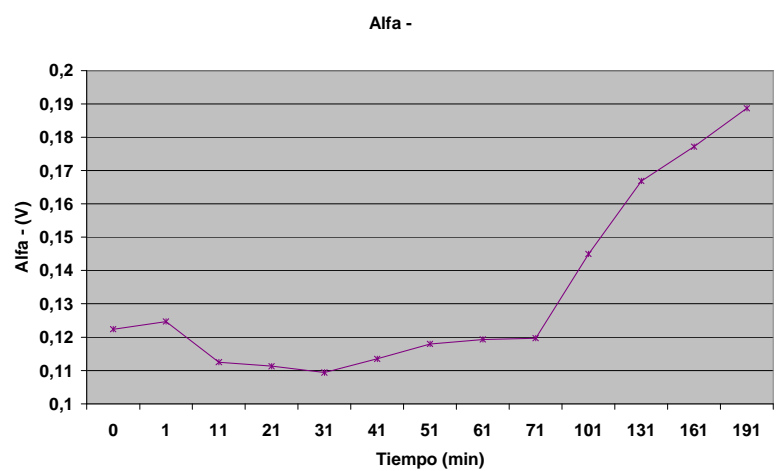
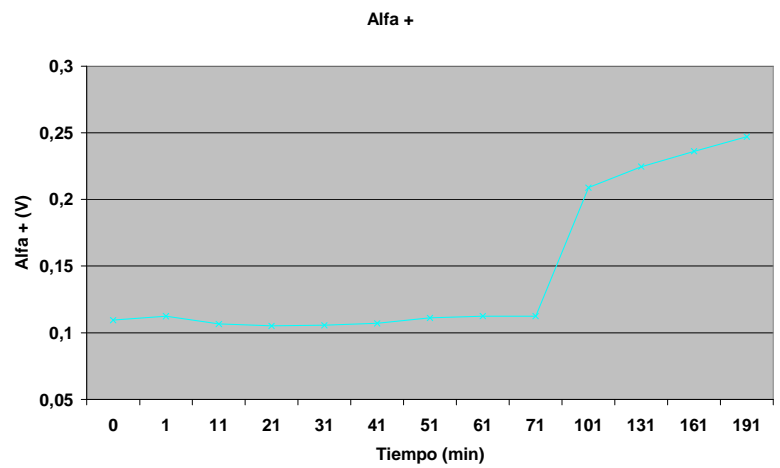


Muestra REA 6

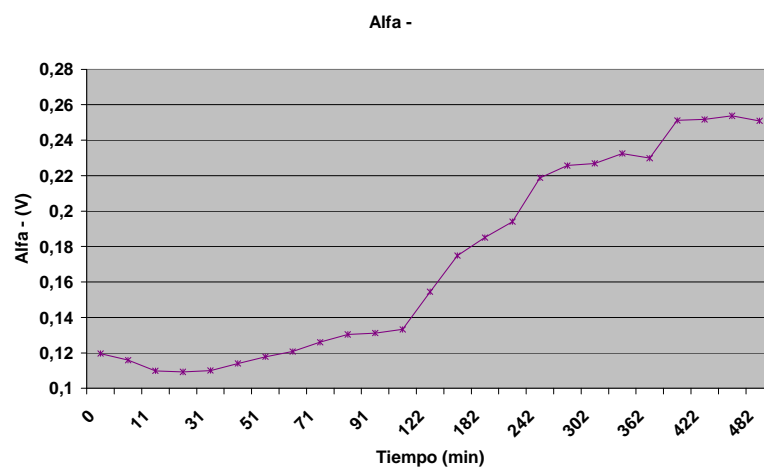
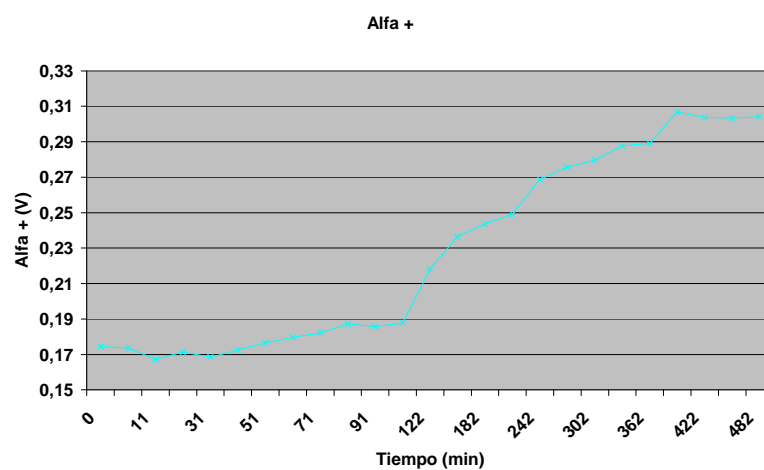




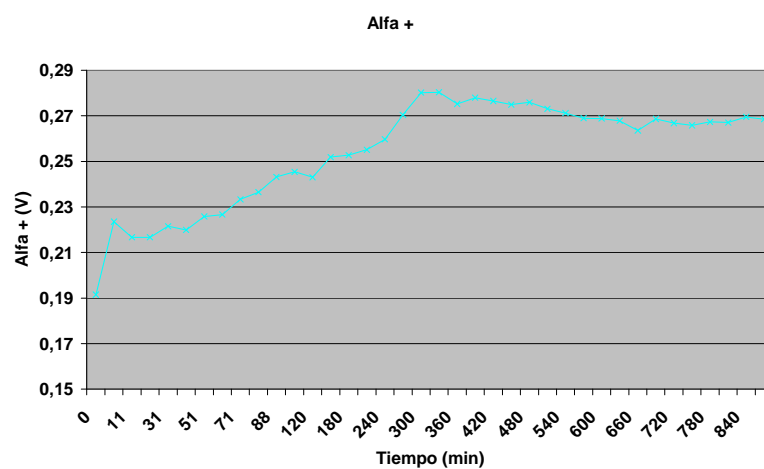
Muestra REA 7

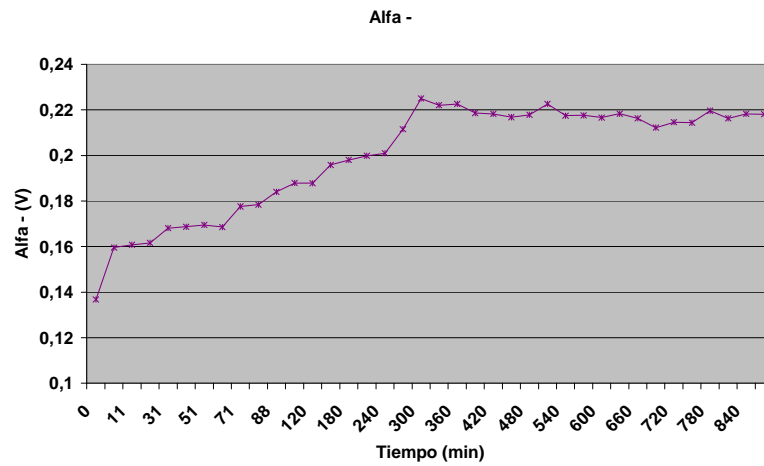


Muestra REA 8

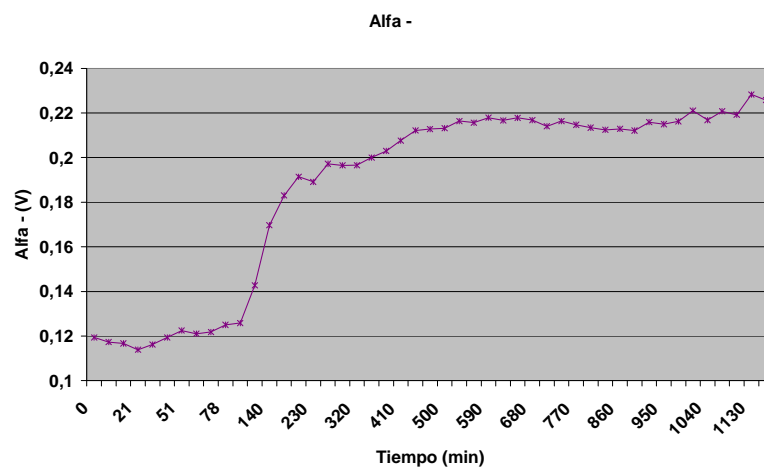
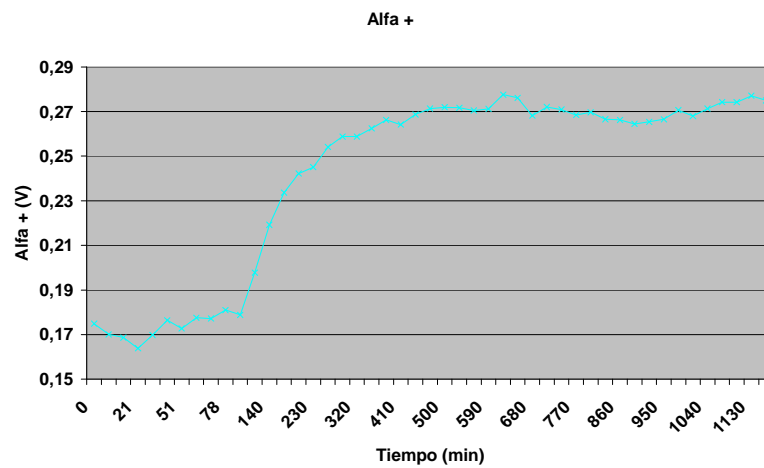


Muestra REA 9

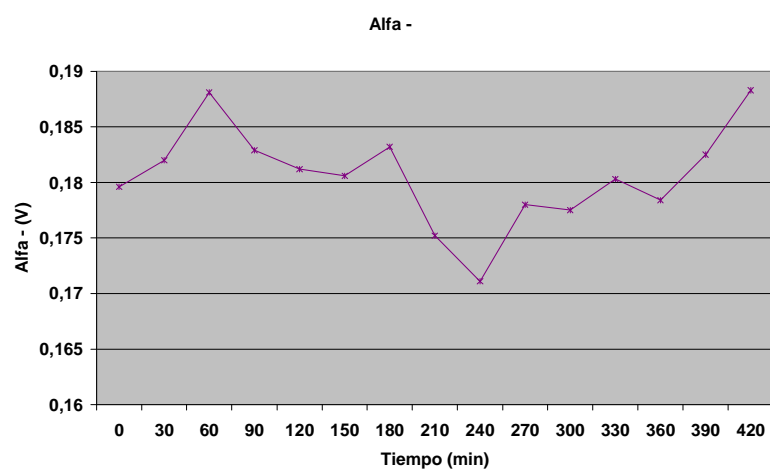
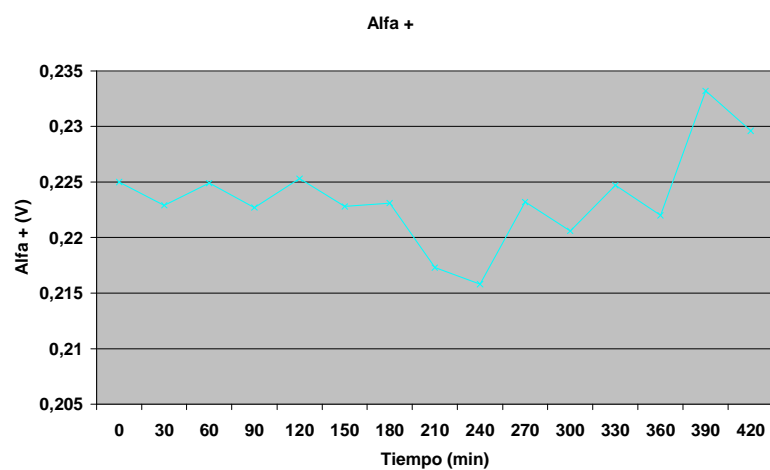




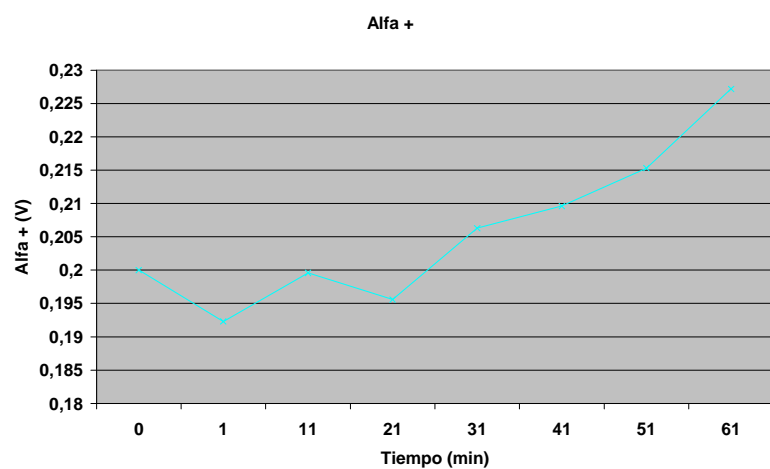
Muestra REA 10

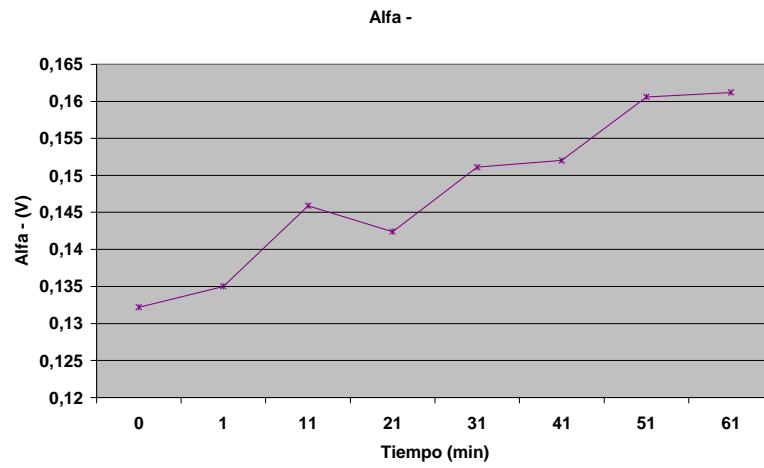


Muestra REA 11

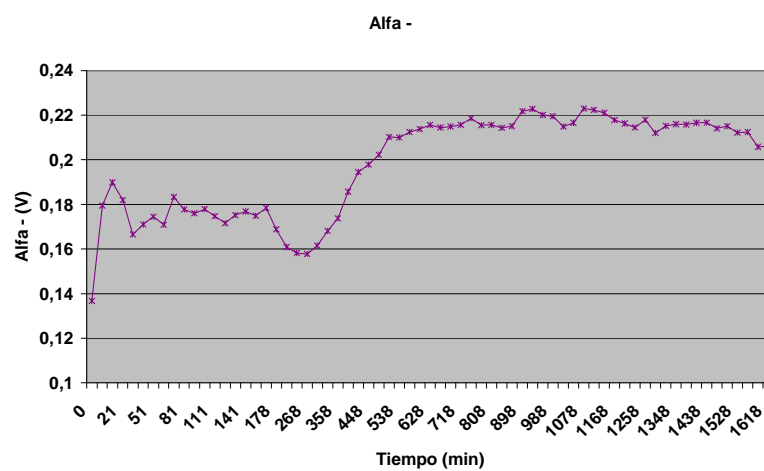
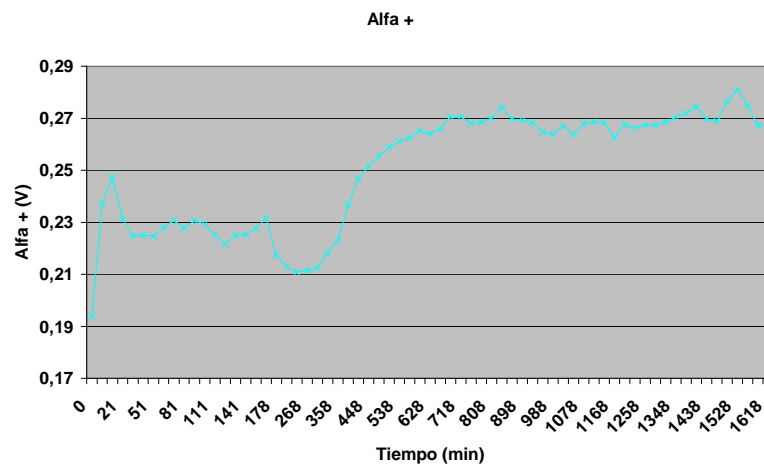


Muestra REA 12





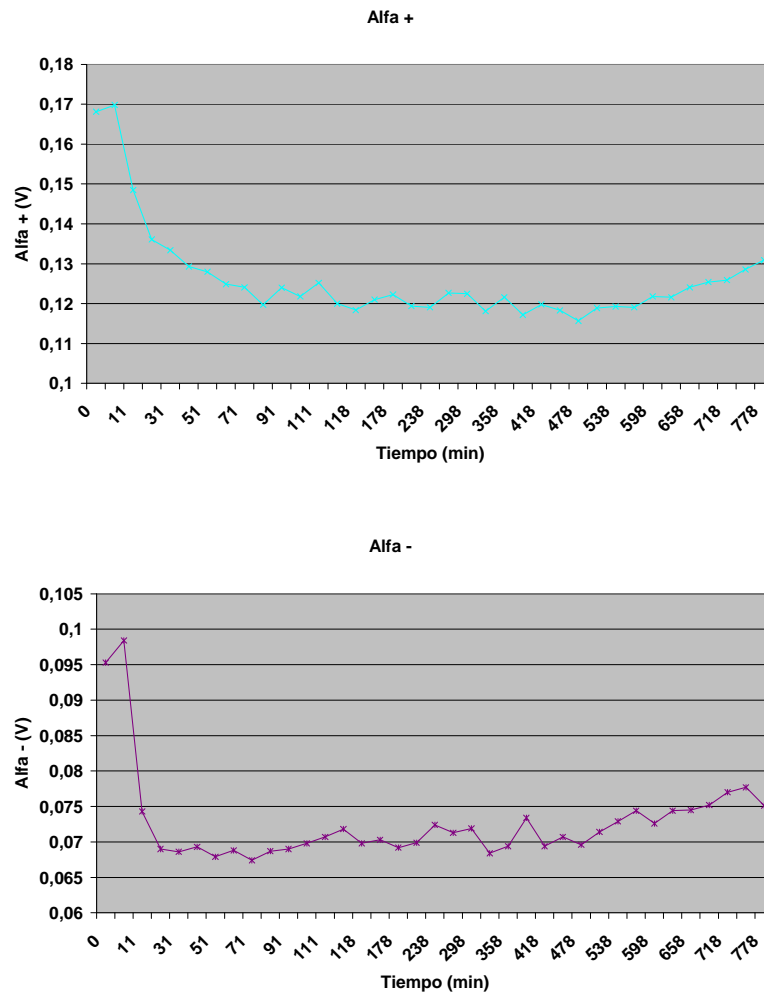
Muestra REA 13



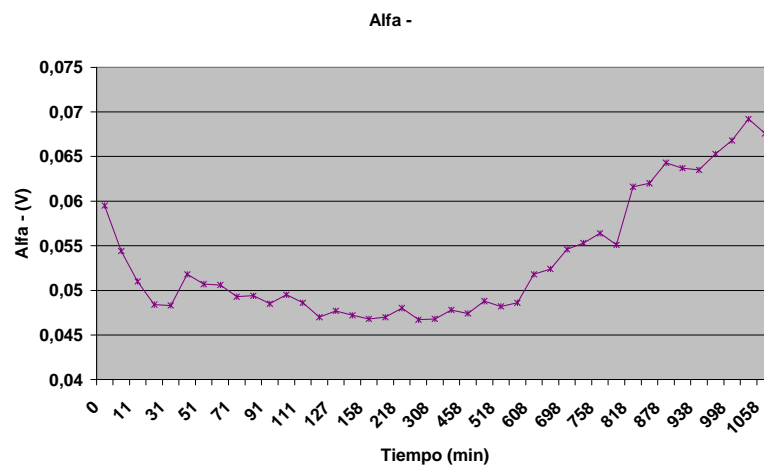
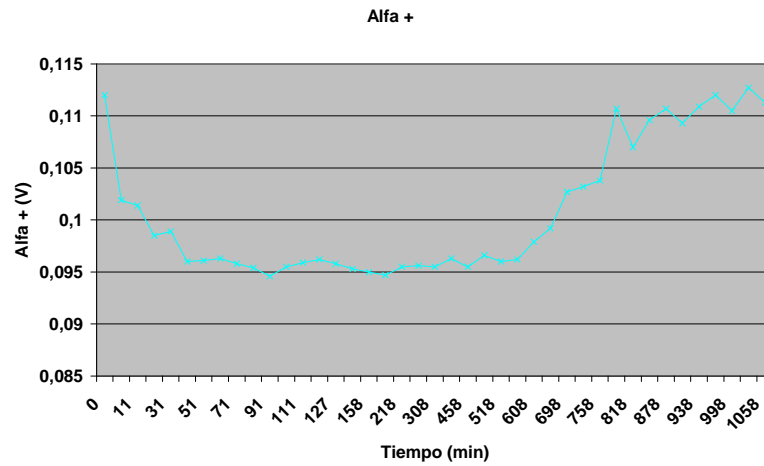
4.3.3.- Alfa de hilo Partzsch.

En 4 de 6 ensayos realizados con este tipo de hilo, hemos obtenido resultados del parámetro *Alfa* con una tendencia creciente. Por tanto el 66% de los ensayos *Alfa* crece conforme aumenta el envejecimiento. El tiempo medido hasta fallo es muy elevado para todas las muestras.

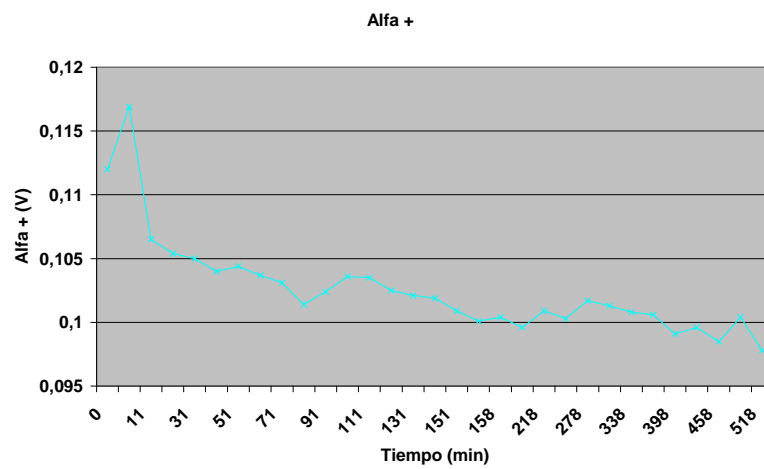
Muestra Partzsch 1

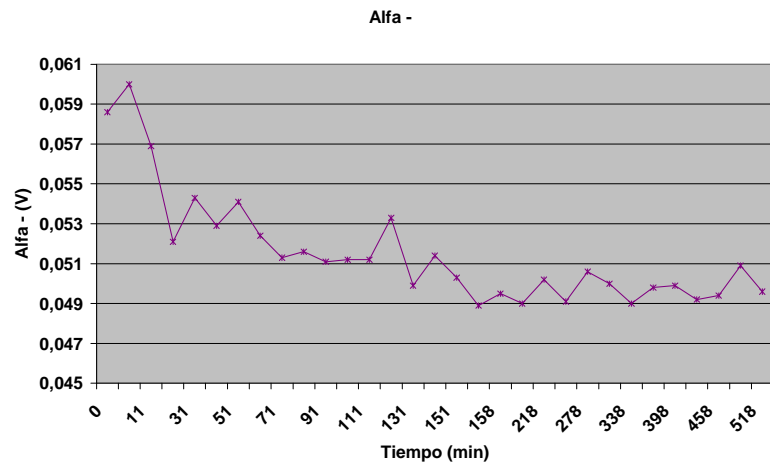


Muestra Partzsch 2

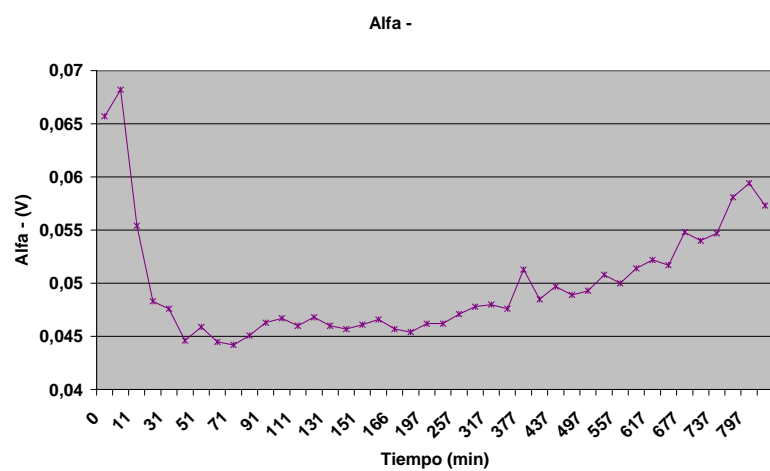
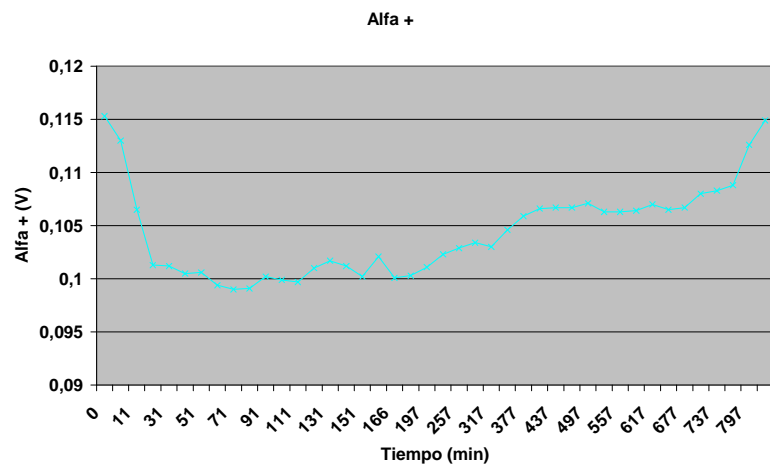


Muestra Partzsch 3

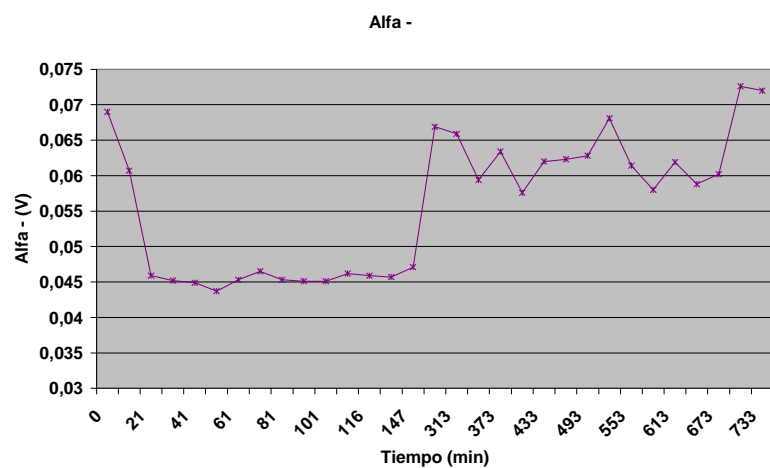
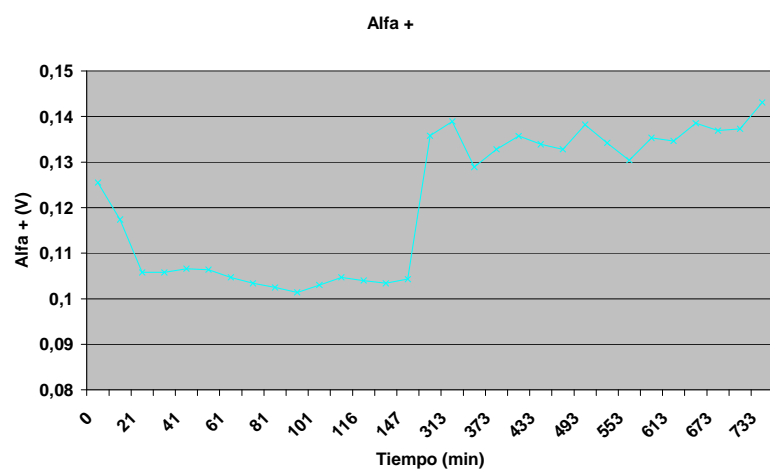




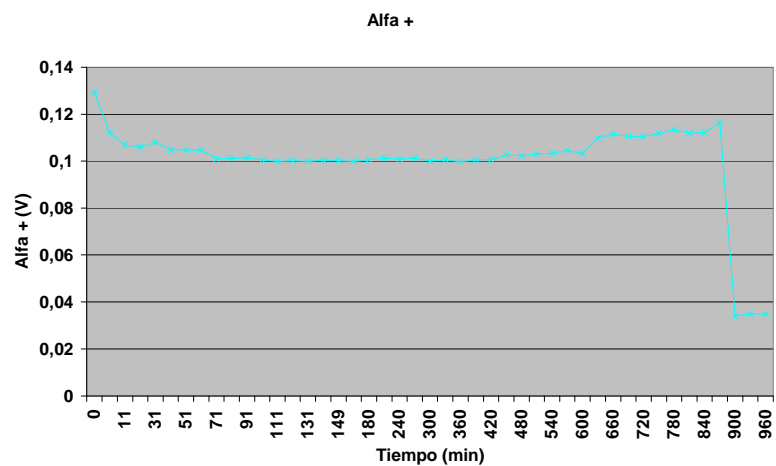
Muestra Partzsch 4

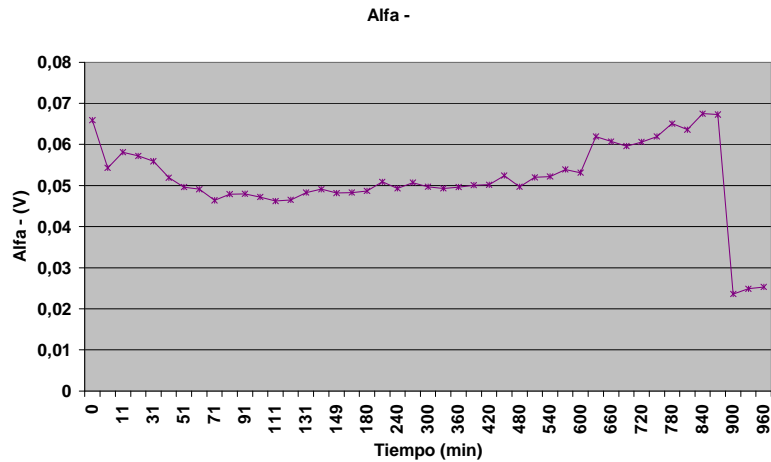


Muestra Partzsch 5



Muestra Partzsch 6





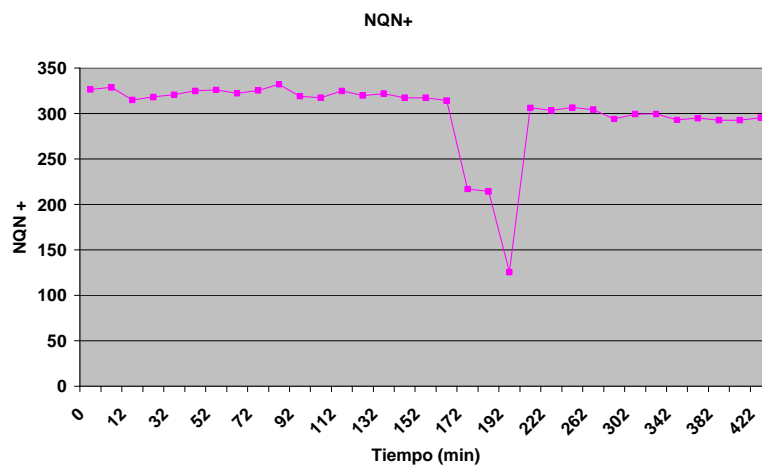
4.4.- Resultados de *NQN*.

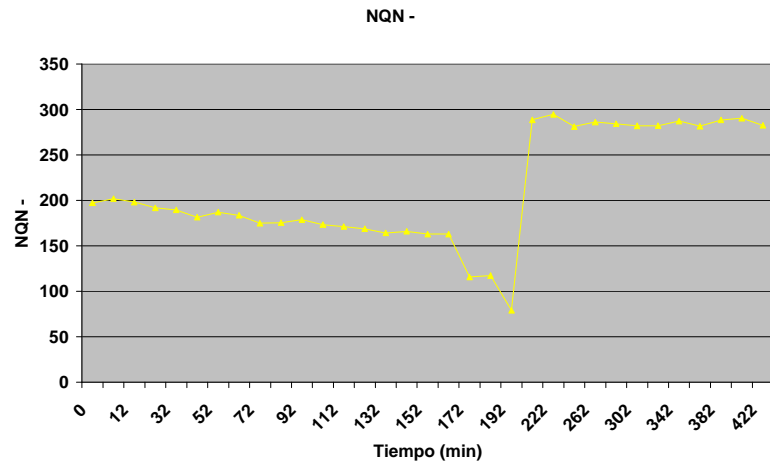
Como se indicó en la sección 2.4, el parámetro *NQN* se emplea en monitorización de sistemas de aislamiento de máquinas rotativas como una cantidad que integra la magnitud y la repetición de las DPs.

4.4.1.- *NQN* de hilo Acebsa.

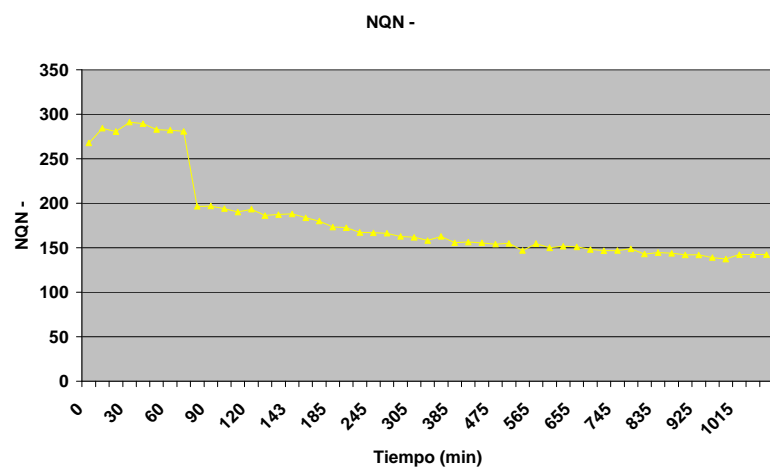
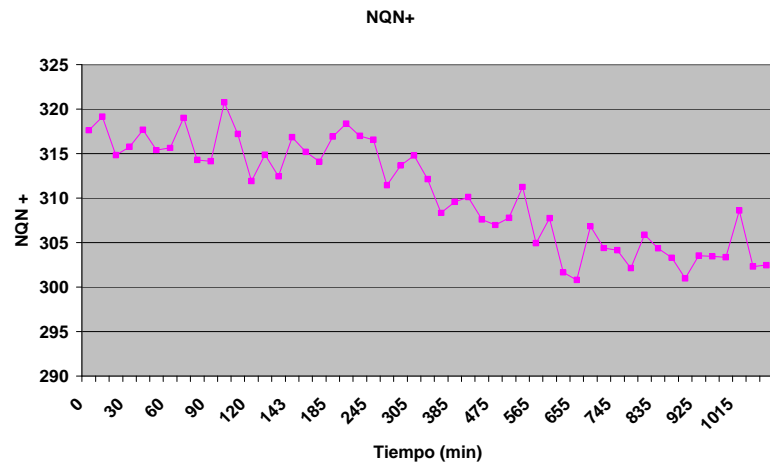
Ninguna de las muestras del hilo Acebsa nos ha otorgado datos que presenten una tendencia creciente para éste parámetro. En 4 de las 5 muestras, *NQN* decrece con el tiempo.

Muestra Acebsa 1

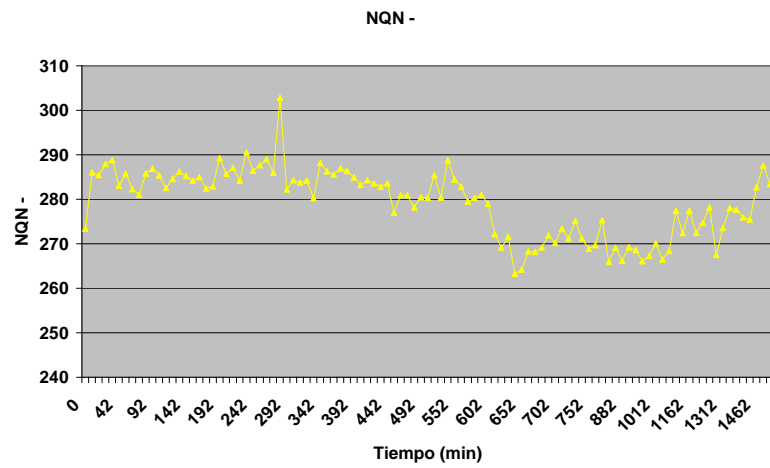
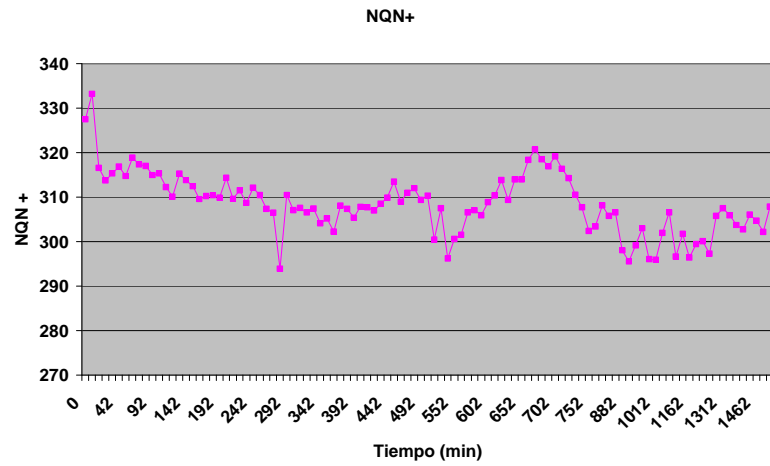




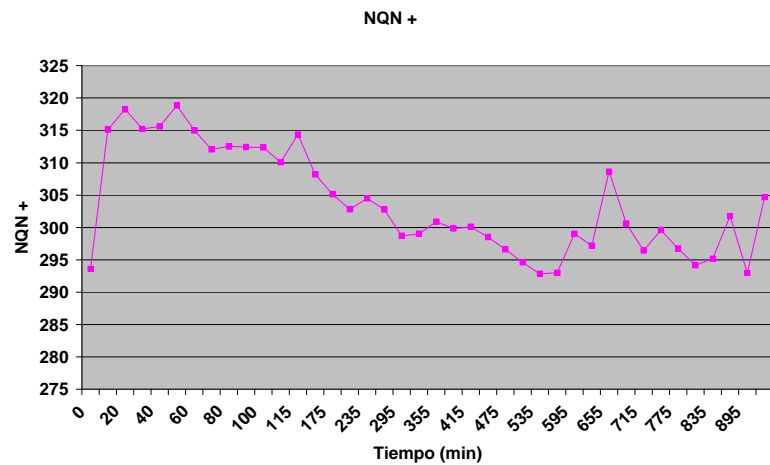
Muestra Acebsa 2

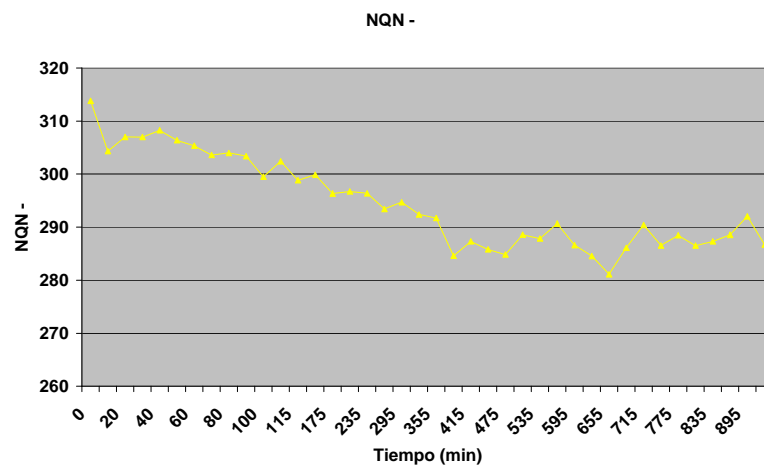


Muestra Acebsa 3

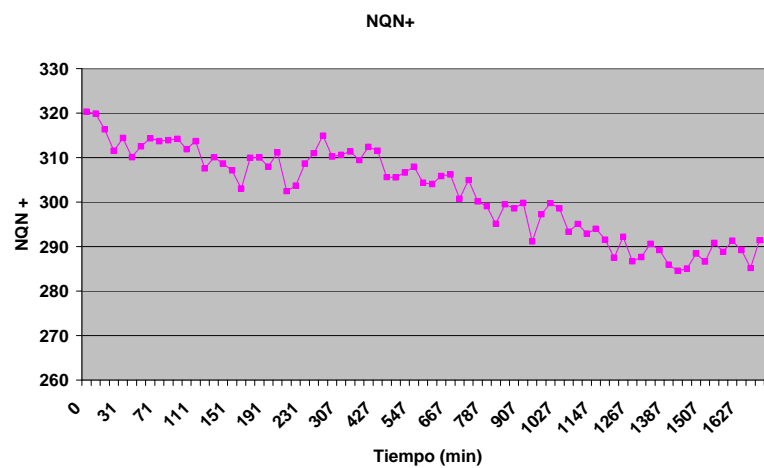


Muestra Acebsa 4





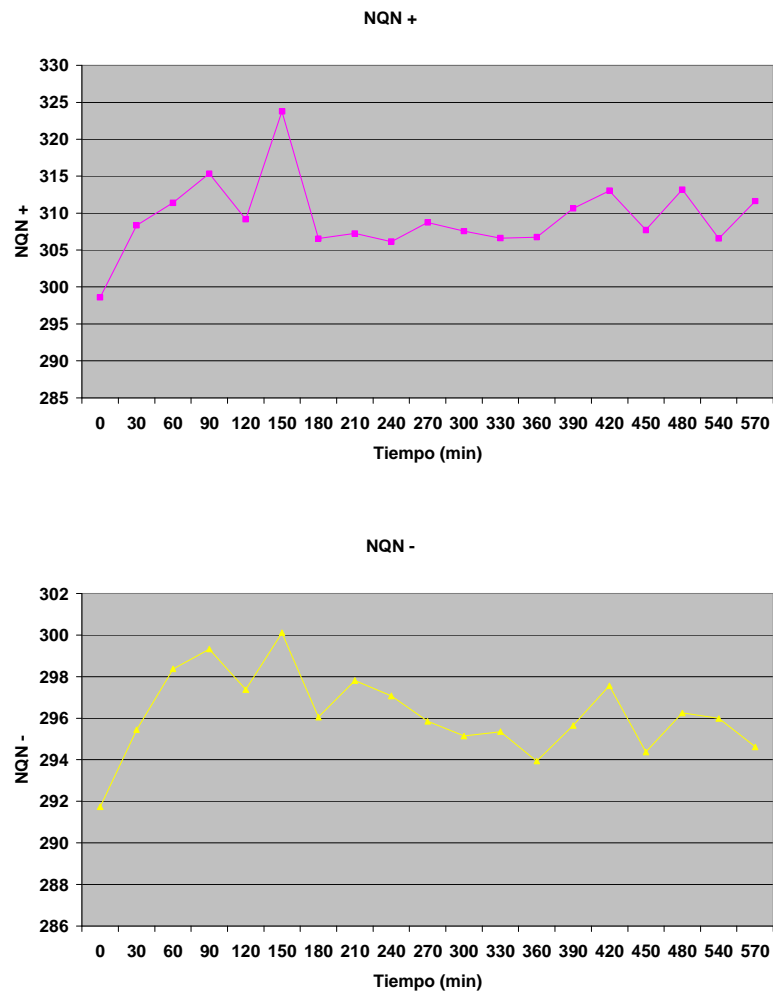
Muestra Acebsa 5



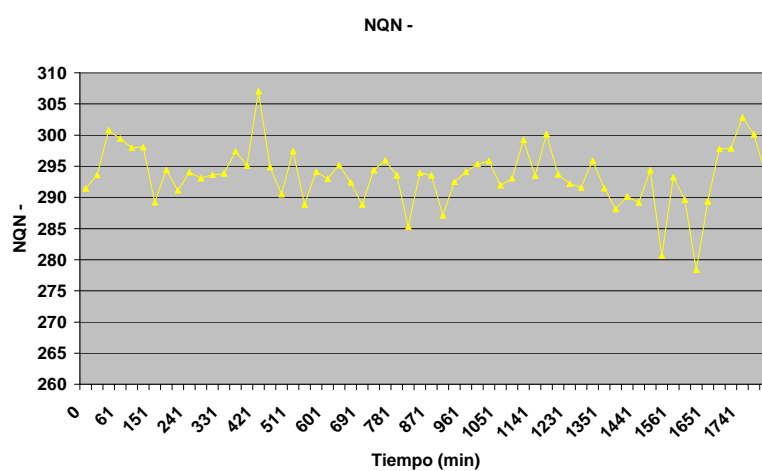
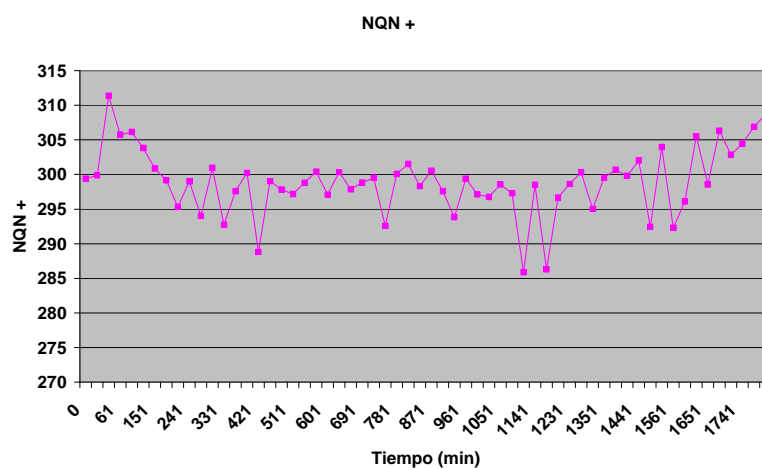
4.4.2.- *NQN* de hilo REA.

El parámetro *NQN* solamente muestra una tendencia creciente en una de las 13 muestras sobre las que se realizó el test. Por tanto, *NQN* muestra un comportamiento contrario a lo que se pensaba y defienden publicaciones del sector [Stone, 1988].

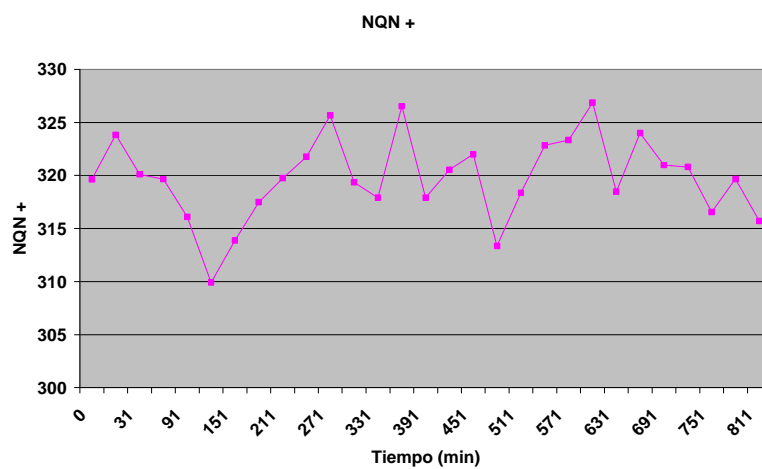
Muestra REA 1

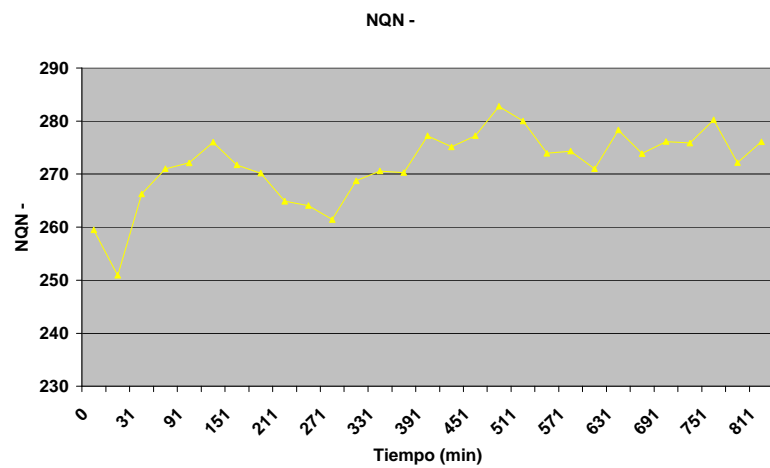


Muestra REA 2

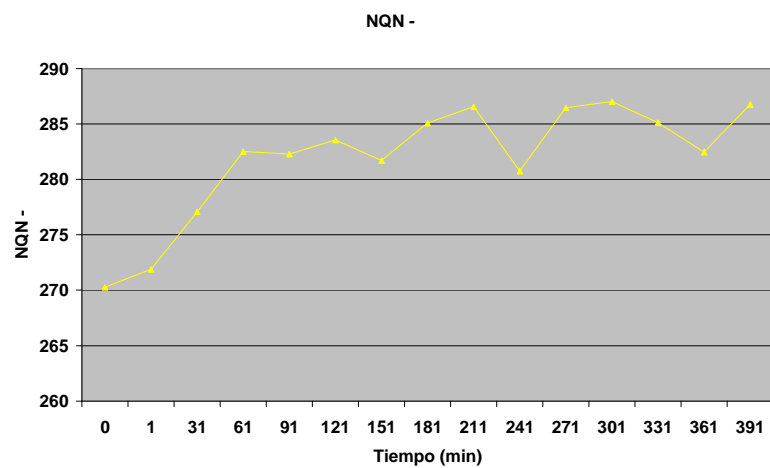
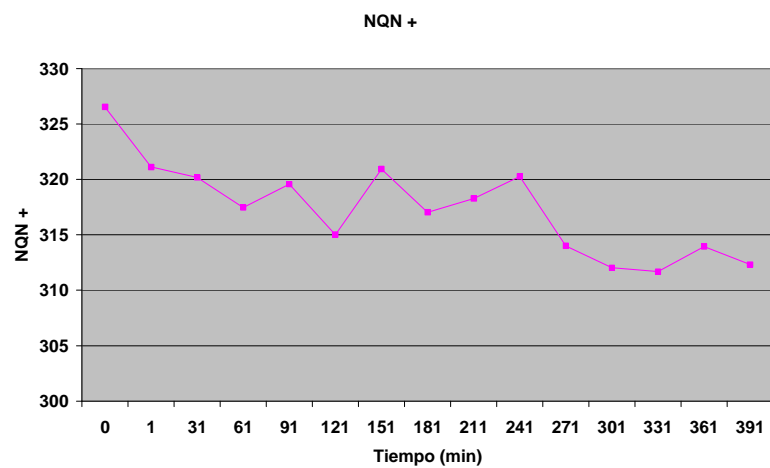


Muestra REA 3

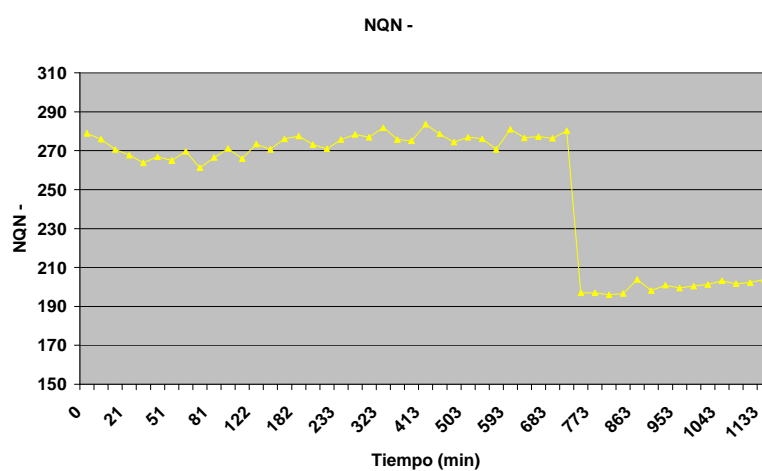
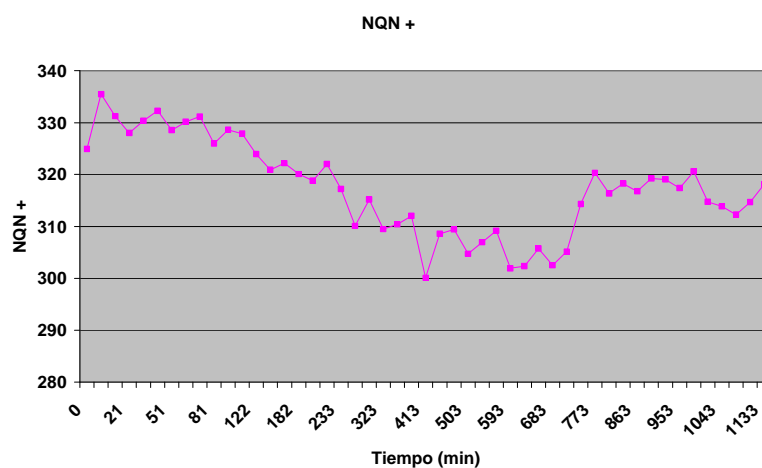




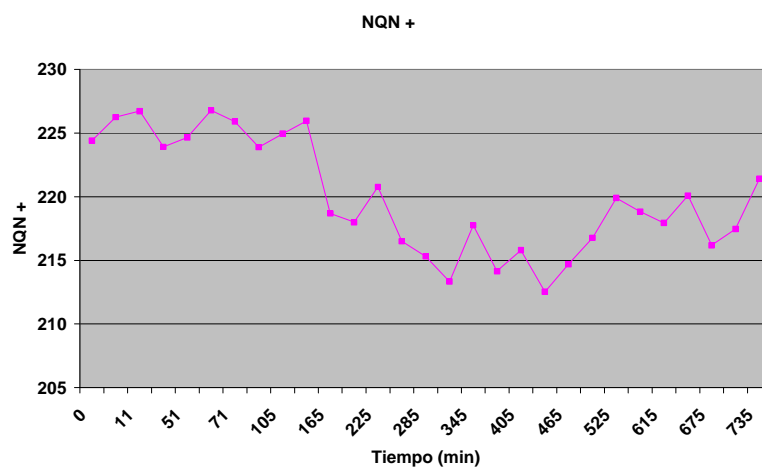
Muestra REA 4

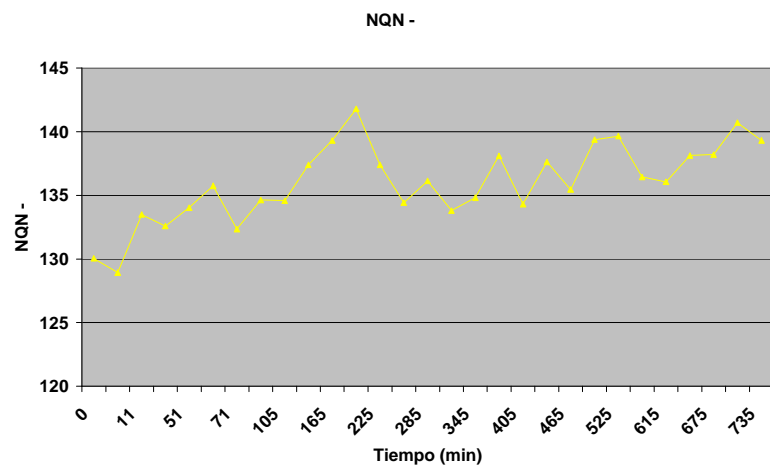


Muestra REA 5

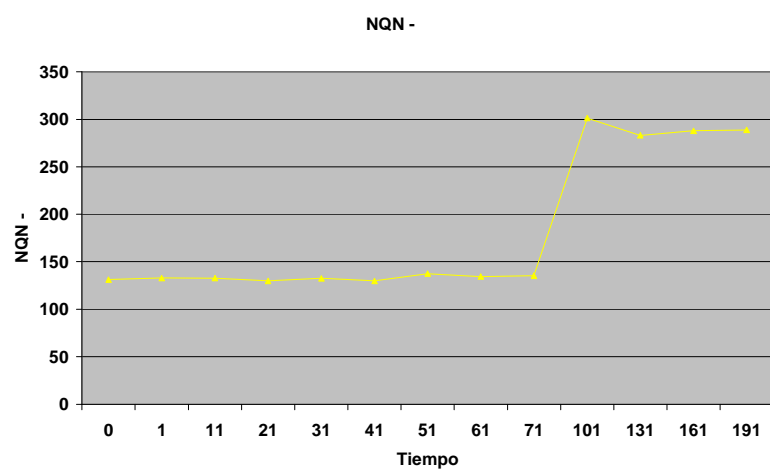
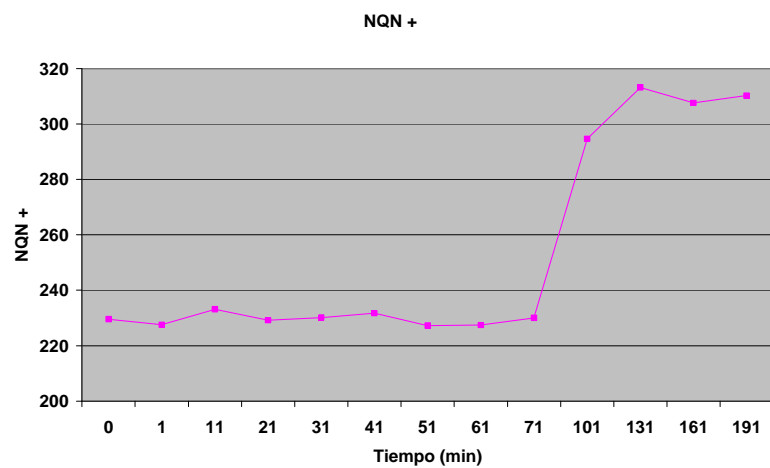


Muestra REA 6

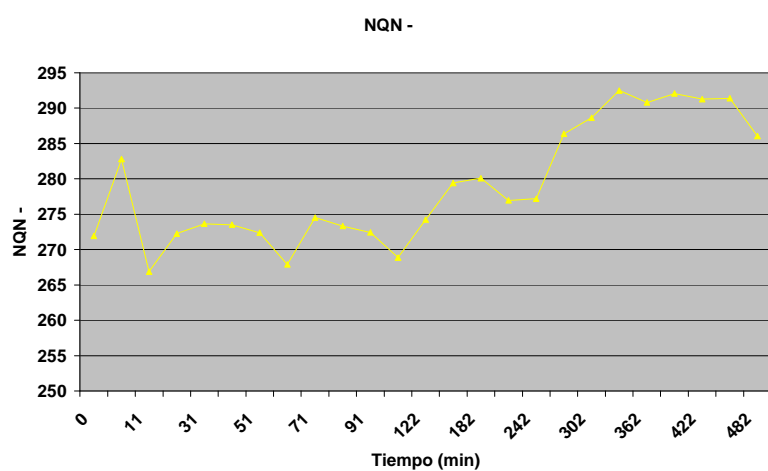
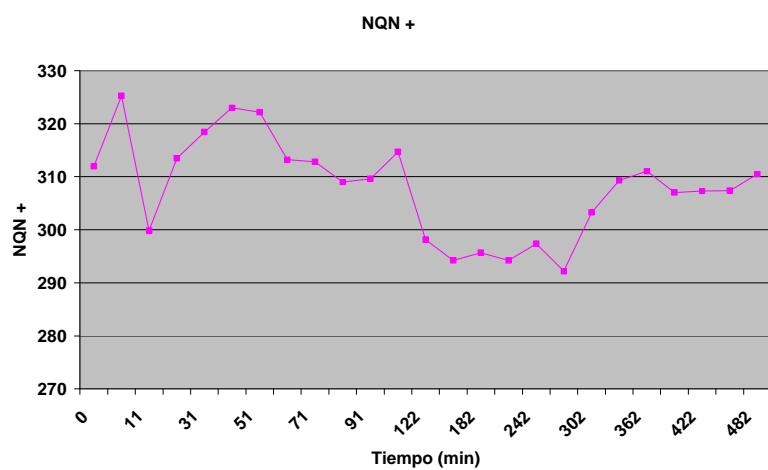




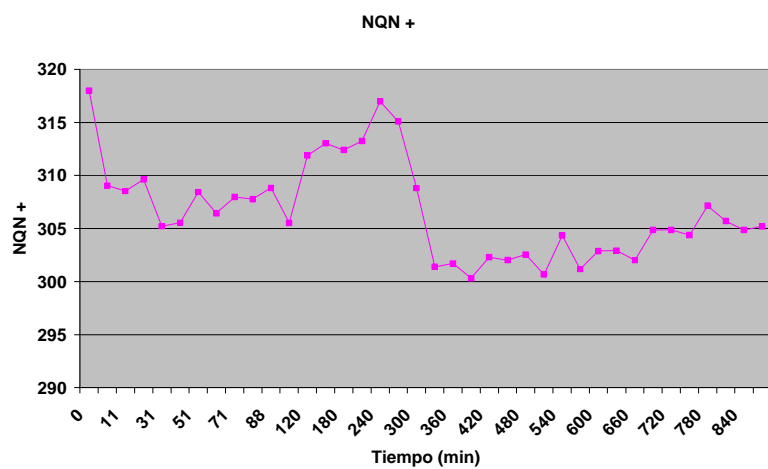
Muestra REA 7

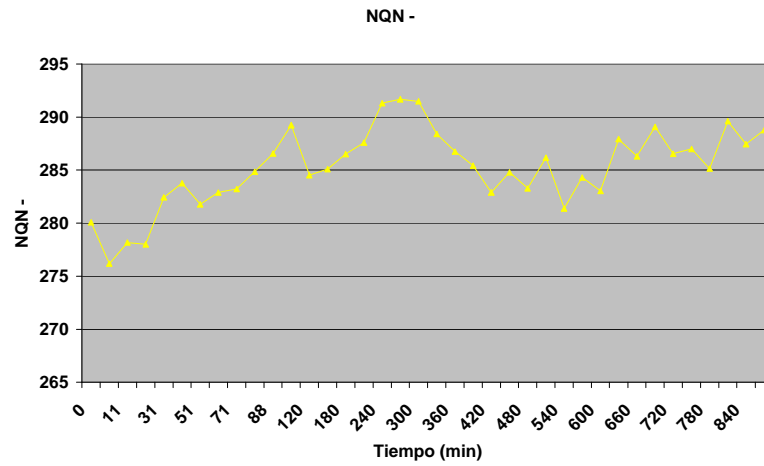


Muestra REA 8

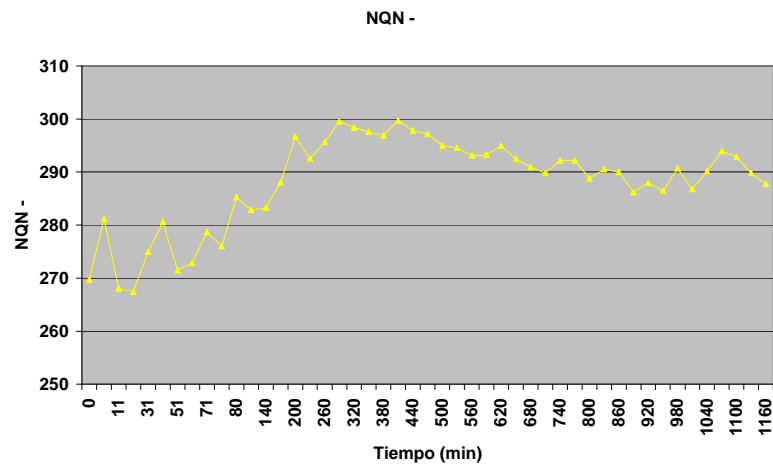
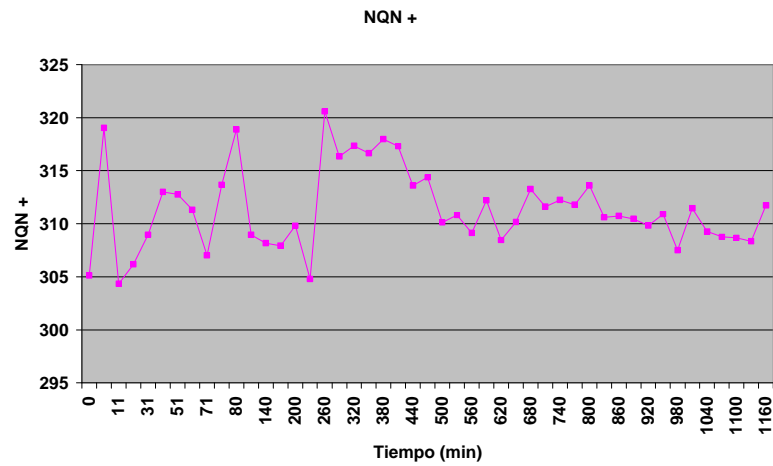


Muestra REA 9

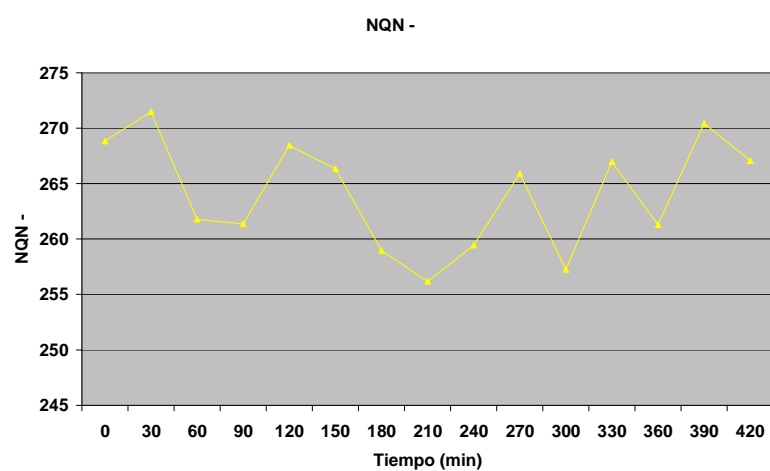
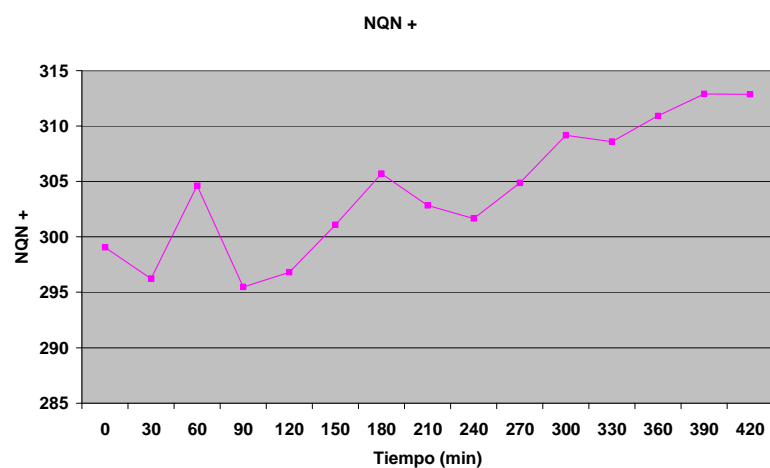




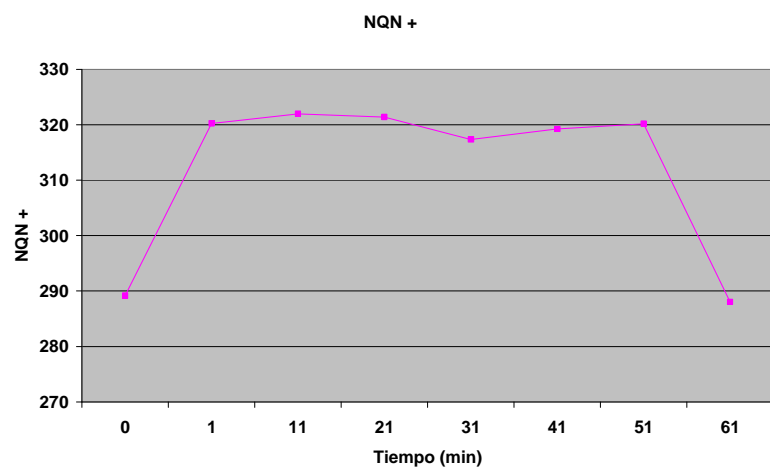
Muestra REA 10

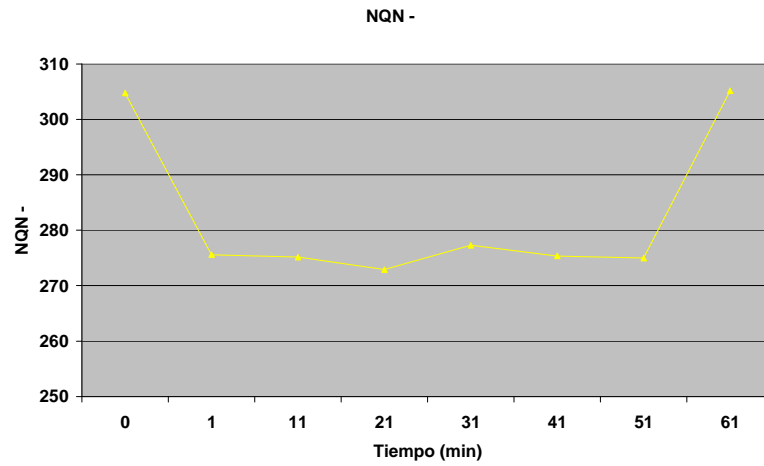


Muestra REA 11

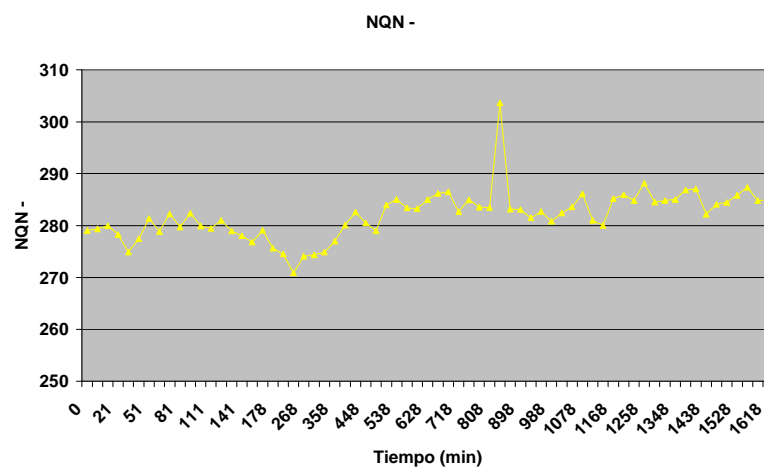
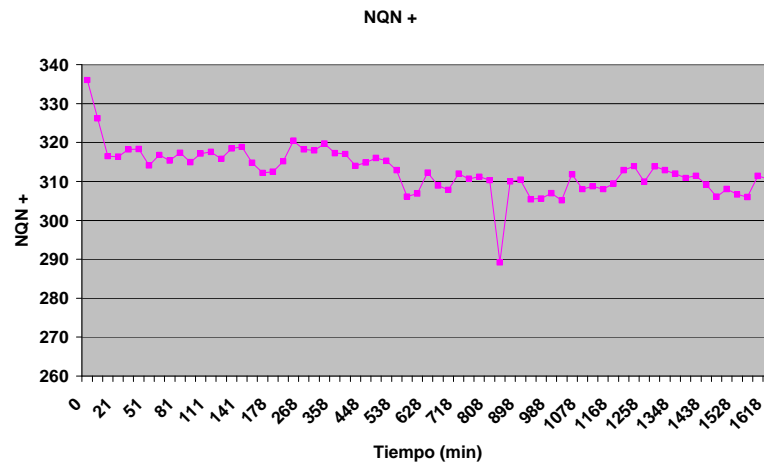


Muestra REA 12





Muestra REA 13



4.4.3.- NQN de hilo Partzsch.

Disponemos de 6 muestras del hilo de cobre Partzsch, y observando los resultados obtenidos, 2 muestras presentan una tendencia creciente para el parámetro NQN . Al igual que para los otros tipos de hilo de cobre, varias de las muestras presentan cambios bruscos de este parámetro en muy poco tiempo. Es más, a pesar de que los patrones de DPs son bastante simétricos (ver Figura 4.5), las curvas $NQN=NQN(t)$ son diferentes para descargas positivas y negativas.

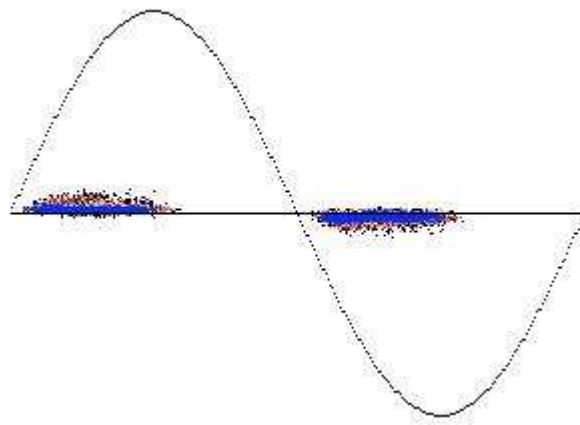
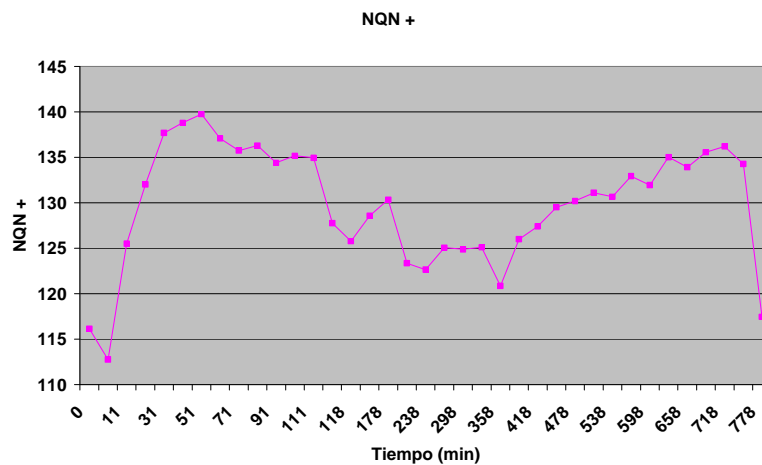
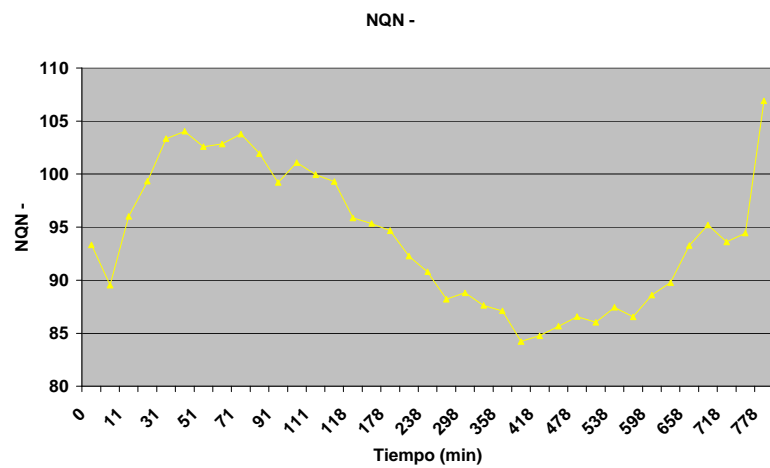


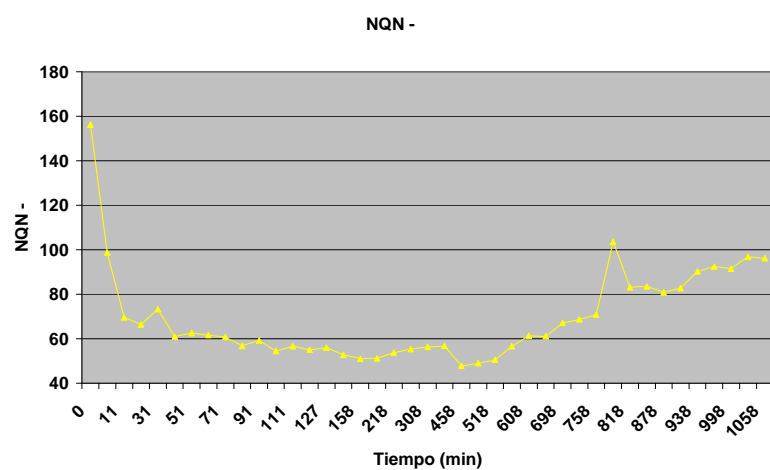
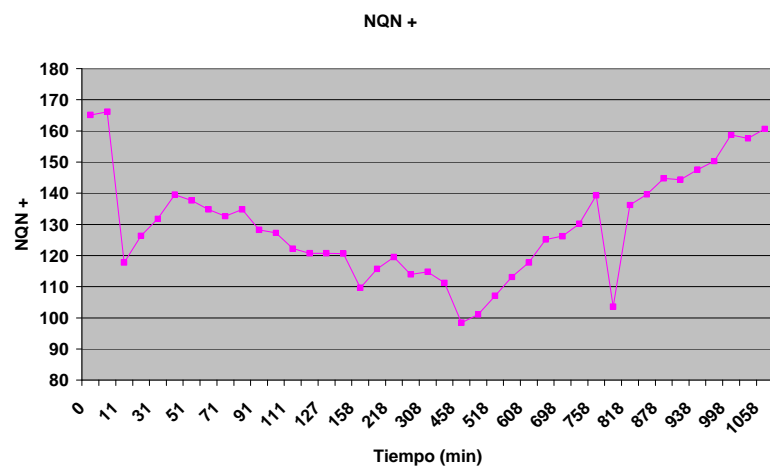
Figura 4.5. Ejemplo de patrón de DP en hilo de cobre Partzsch.

Muestra Partzsch 1

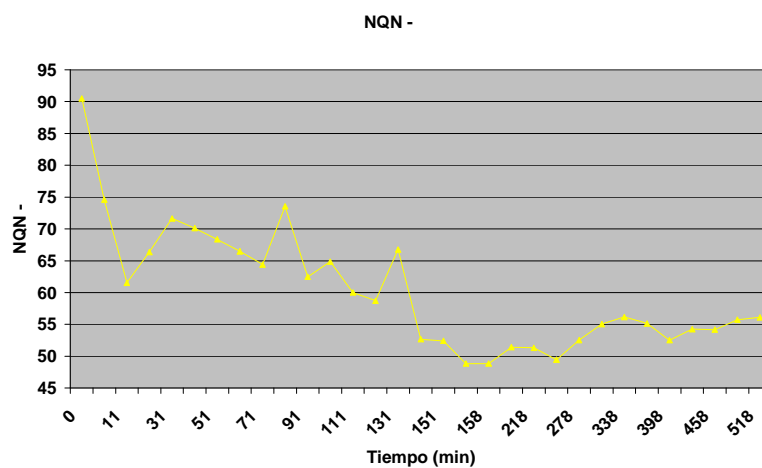
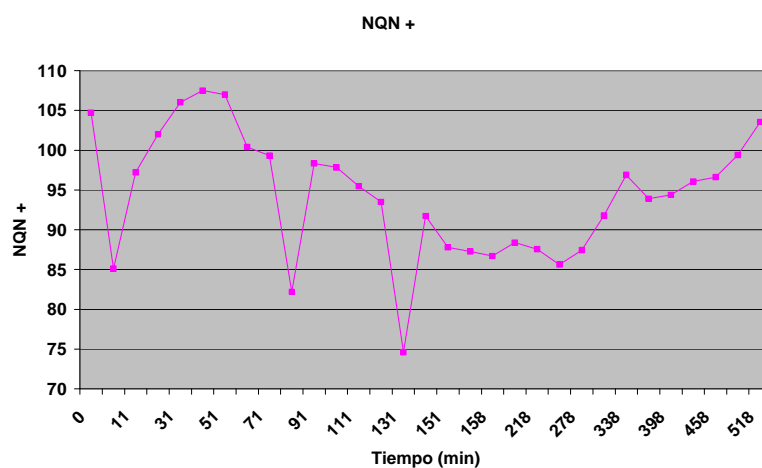




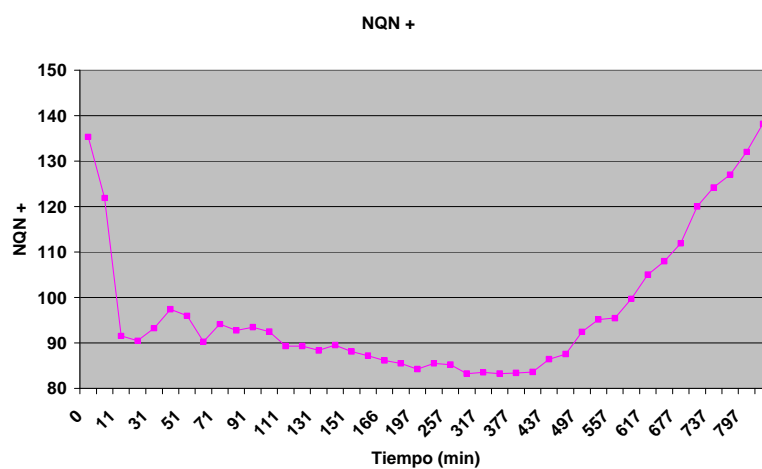
Muestra Partzsch 2

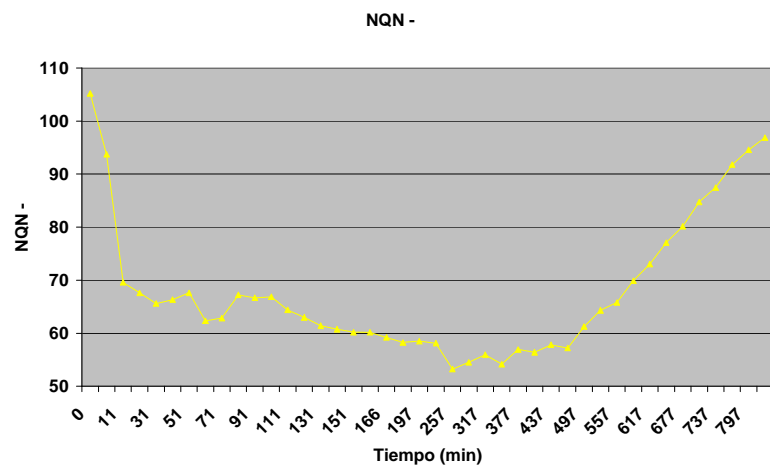


Muestra Partzsch 3

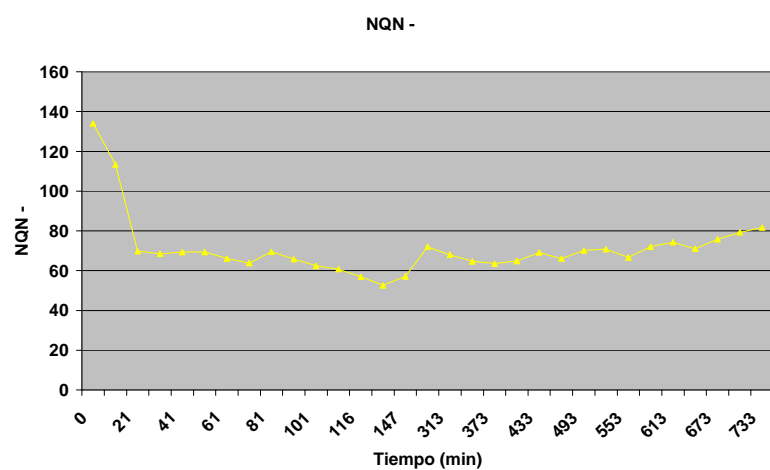
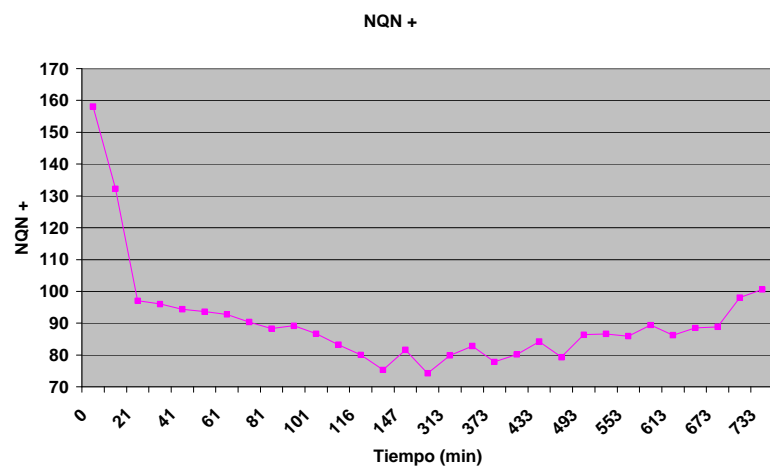


Muestra Partzsch 4

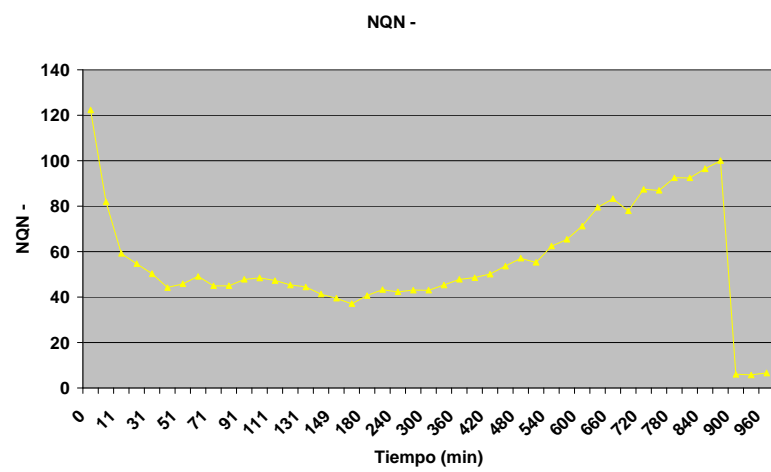
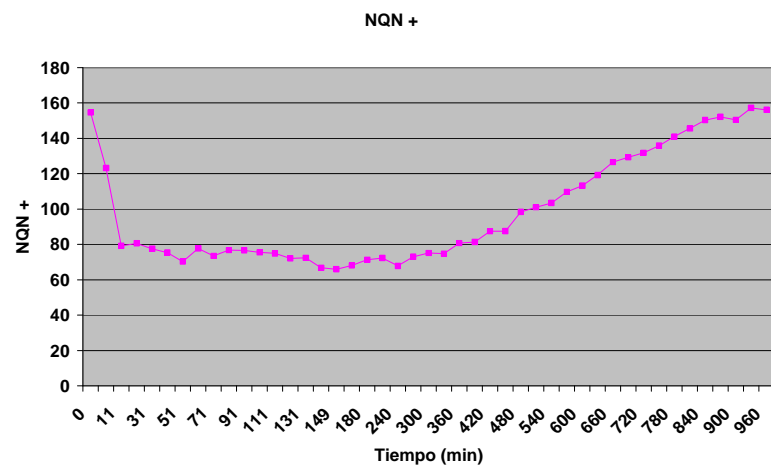




Muestra Partzsch 5



Muestra Partzsch 6



4.5.- Resumen de resultados obtenidos.

En este apartado vamos a resumir las conclusiones que hemos obtenido analizando con una perspectiva crítica los resultados del test de DP. Se recuerda que a la hora de realizar el análisis de los datos obtenidos, NO se tienen en cuenta los datos de los primeros minutos de ensayo, debido al fenómeno de acondicionamiento de la actividad de DP (aprox. 30 minutos).

En todas las muestras del hilo de cobre Acebsa, el parámetro Q_{max} 95% tiene una tendencia creciente, esto significa que según aumenta la degradación del material, las DP que se producen son de mayor magnitud, y por tanto de alguna manera nos están demostrando que el parámetro puede tratarse de un indicador del estado del material que está siendo analizado. Debido a que se observa que conforme avanza el tiempo de ensayo, el valor del parámetro es mayor. En el 60% de las muestras de hilo Acebsa el parámetro Alfa ha tenido una tendencia claramente creciente, esto es debido al aumento de la magnitud media de las descargas causado por el envejecimiento del material (como ya comentamos anteriormente). Por tanto, consideramos que el parámetro Alfa puede tratarse de otro indicador del deterioro del aislamiento. El parámetro NQN no obtuvo tendencia creciente en ninguna de las muestras de este hilo, al contrario, ya que en la mayoría muestra un comportamiento errático e incluso algunos presentan una tendencia decreciente. Los resultados no son los esperados debido a que este parámetro está considerado por diversos estudios como un indicador de la degradación de los materiales sometidos a ensayos de DP; un ejemplo de esto es la referencia [Cetano, 1988]. El número de muestras de hilo, en este caso 5, puede parecer pobre pero en ningún caso afecta a la fiabilidad estadística de los datos, ya que esta cantidad se consideró suficiente para realizar el análisis como causa de la baja dispersión de vida media obtenida en los ensayos. La conclusión de todo esto es que sólo podemos asegurar que Q_{max} 95% nos proporciona una información importante para tener una idea del estado en que se encuentra el material aislante. En cambio los resultados obtenidos para Alfa indican que este parámetro no es del todo fiable para conocer la degradación que presenta el aislamiento, y menos aún en el caso del parámetro NQN , del que no observamos tendencia alguna conforme avanza el tiempo de ensayo.

Un 85% de las muestras de hilo REA presentan una tendencia claramente creciente de Q_{max} 95%, lo que significa que el parámetro aumenta con el tiempo de ensayo, y por lo tanto con la degradación. Al igual que para Q_{max} 95%, en el 80% de las muestras de este hilo se observa una tendencia creciente para el parámetro Alfa , que nos indica que la magnitud de las descargas crece directamente con el tiempo de ensayo. Como nos ocurrió con el hilo anterior, el parámetro NQN no nos muestra una clara tendencia conforme avanza el tiempo de ensayo en ninguna de las muestras, salvo en una. Los tiempos hasta fallo en este tipo de hilo de cobre son muy elevados en general, salvo en una muestra, lo que es bastante interesante a la hora de observar la tendencia de los parámetros a analizar. En el caso de este hilo, se utilizó un mayor número de muestras debido a la elevada dispersión de tiempo de vida de las mismas y así obtener fiabilidad en los resultados. Coincidiendo con las conclusiones del primer tipo de hilo, deducimos a partir de los resultados de los ensayos que los parámetros Q_{max} 95% y Alfa nos proporcionan una información acerca del estado en que se encuentra el aislamiento, y en el caso del parámetro NQN no podemos tenerlo en cuenta a la hora de sacar conclusiones.

El hilo de cobre Partzsch presenta una tendencia creciente para el parámetro $Q_{max} 95\%$ en el 50% de las muestras analizadas. Un 67% de las muestras nos proporcionan una tendencia creciente para el parámetro $Alfa$. Sólo 2 de las 6 muestras sometidas a ensayo presentan una tendencia creciente del parámetro NQN conforme avanza el tiempo de ensayo, aunque se trata del único hilo que muestra una cierta tendencia para este parámetro. Por lo tanto deducimos que según los datos de este tipo de hilo, los parámetros analizados $Q_{max} 95\%$ y $Alfa$ siguen indicando una estimación del grado de deterioro que presenta el material aunque también hay que decir que con menor fiabilidad. La fiabilidad del parámetro NQN , aunque mejor que anteriormente, es insuficiente para tomarlo como indicación del grado de envejecimiento. Otro dato a tener en cuenta es el número de muestras analizadas que en este caso fueron 6, y que se consideran suficientes para obtener fiabilidad en los resultados.

La conclusión global que se obtiene de todos estos ensayos es que el parámetro $Q_{max} 95\%$ es un claro indicador del estado de degradación del material aislante, como consecuencia de que en la mayoría de las muestras su tendencia es claramente creciente frente al tiempo de ensayo, su fiabilidad estadística para los tres tipos de hilo de cobre es del 78% (Figura 4.6). El parámetro $Alfa$ también nos proporciona información acerca de la degradación que sufre el aislamiento aunque ésta no es tan concluyente, pues los patrones de adquisición presentan magnitudes de descarga muy dispersas (bajos valores de β) y es justificable que el promedio estadístico sea menos fiable que los límites superiores estadísticos de descarga detectada (por debajo de los cuales estén el 95% de las magnitudes detectadas). En cambio, no podemos asegurar que el parámetro NQN sea un indicador del nivel de degradación causada en el material, debido a que en ninguno de los tres tipos de hilo de cobre presenta una clara tendencia creciente frente al tiempo de ensayo. La conclusión que se obtiene es que en el caso de los parámetros $Q_{max} 95\%$ y $Alfa$ los resultados de los test concuerdan con una gran cantidad de estudios realizados por profesionales del sector, que sostienen la idea de que estos parámetros analizados en nuestros ensayos son un indicador del estado en que se encuentra el sistema de aislamiento o el material. Pero en el caso del parámetro NQN , nos ocurre todo lo contrario de lo que se esperaba y en ningún caso obtenemos resultados que demuestren que éste parámetro puede tratarse de un indicador de los daños causados en un sistema aislante. Hay que indicar que este parámetro se emplea en monitorización de Máquinas completas, por lo que quizás la indicación que aporte sobre las DP's totales en todos los sistemas de aislamiento (espira-espira, fase-fase, fase-tierra....) sea más eficiente. En todo caso, para sistemas sencillos, el parámetro no aporta indicación alguna sobre los mismos (Figura 4.6).

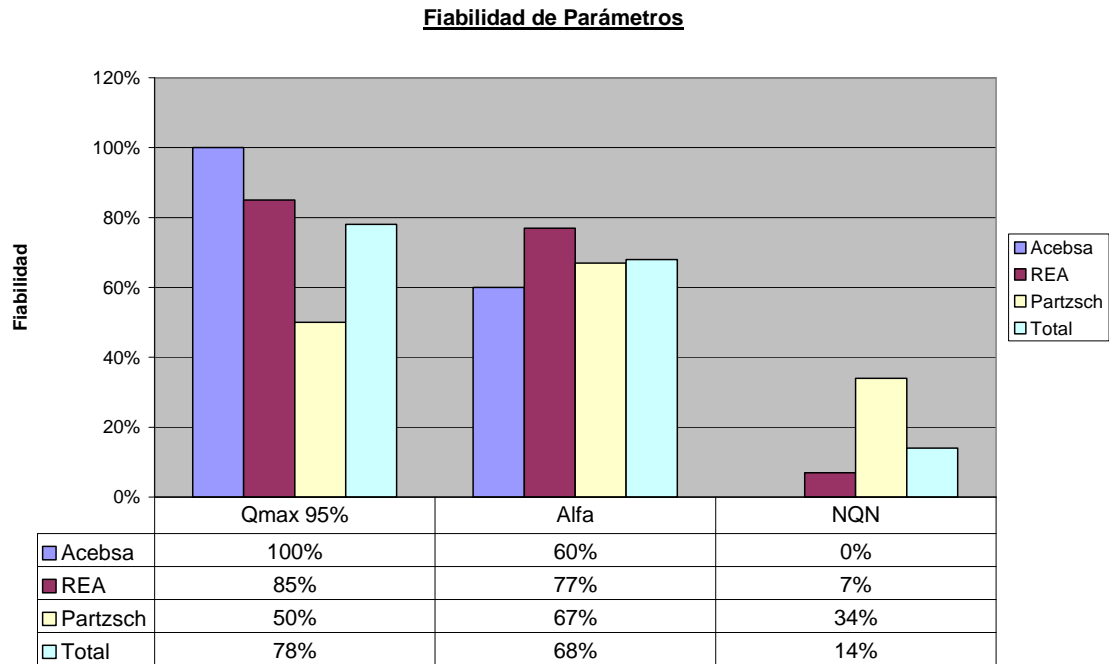


Figura 4.6. Gráfica de la fiabilidad de los parámetros Q_{max} 95%, Alfa y NQN con cada muestra de hilo de cobre y de su fiabilidad total.

Para que los resultados de estos test sean lo más fiables posibles es necesario realizar los ensayos con el mayor número de muestras posibles. Cuantas más muestras se analicen, obtendremos una mayor aproximación a la distribución de Weibull.

En general los tres tipos de hilo de cobre que hemos sometido al test de DP lo han superado de forma satisfactoria, los tiempos hasta fallo son lo suficientemente elevados como para asegurar que cualquiera de los hilos de cobre analizados es capaz de soportar las condiciones normales de funcionamiento durante un largo espacio de tiempo.

5.- Conclusiones.

En este trabajo se ha tratado de mostrar las ventajas de la monitorización de Descargas Parciales mediante el uso de sistemas de adquisición automática.

Para alcanzar este objetivo se ha realizado una introducción al fenómeno de las DP, sistemas de aislamiento de máquinas rotativas, y mecanismos de envejecimiento prematuro. Se proporciona información sobre los principales ensayos de mantenimiento y aceptación y de envejecimiento acelerado. Además analizamos las prestaciones de las nuevas aplicaciones de monitorización y adquisición de datos de DP. Todo esto nos sirve para recopilar información y adquirir conocimientos acerca de la monitorización de DP.

El equipo *PDBase* ya se utilizaba con anterioridad para la adquisición de DP sobre máquinas eléctricas rotativas, aunque estas adquisiciones se tenían que realizar de forma manual. Con la llegada de la monitorización, y la llegada del software *PDMonitor* y *PDCheck Control* y su equipo *PDCheck*, la capacidad del equipo mejora sustancialmente, aportando numerosas ventajas. Ahora se puede monitorizar durante el tiempo necesario, incluso sin necesidad de permanecer en el lugar de ensayo, realizando adquisiciones con el intervalo de tiempo deseado entre una y otra. Una vez obtenidos los datos se tiene la posibilidad de observar la tendencia durante el tiempo de ensayo y analizar el comportamiento con mayor profundidad. Con la aparición de equipos de monitorización como *PDCheck* o similares, podemos controlar el ensayo, obtener los datos hasta el momento para realizar un pre-análisis del ensayo e incluso detenerlo, sin movernos de nuestra casa o desde cualquier lugar del mundo debido a que permite su control a través de Internet.

Se realizaron ensayos de envejecimiento por DP en varias muestras de tres fabricantes de hilo de cobre utilizando el equipo *PDBase* junto con el software *PDMonitor*. Estos ensayos fueron de tipo destructivo, de manera que se les aplicó una tensión hasta que se apreciaba una actividad elevada de DP y se mantenían así hasta que se producía el fallo del material aislante, midiendo el tiempo hasta el mismo. A partir de los datos obtenidos hemos analizado la tendencia de los parámetros *Qmax 95%*, *Alfa* y *NQN* que se suponían indicadores del grado de deterioro del aislamiento.

En nuestro caso, el parámetro con mayor fiabilidad resultó ser *Qmax 95%*, seguido del parámetro *Alfa*, por el contrario, el parámetro *NQN* no presenta fiabilidad alguna a la hora de indicar la degradación en estos test. Aunque el aumento (estadístico) de la magnitud de las descargas involucradas como indicador de fallos anticipados está documentado igualmente en máquinas rotativas ([Stone, 2004]), en el caso de *NQN* las medidas sobre sistemas particulares de aislamiento muestra conclusiones diferentes a las medidas directas sobre maquinaria documentadas por otros estudios.

Este trabajo puede servir de guía para una persona que necesite introducirse en este tipo de ensayos y sistemas de adquisición, además de proporcionarle una introducción al fenómeno de las DP y sistemas de aislamiento de maquinaria rotativa.

Concluimos comentando que este tipo de equipos de detección y monitorización de DP se encuentra en pleno auge y desarrollo, estamos seguros que se trata de un método que va a proporcionar grandes ventajas a la hora de realizar mantenimientos y

predecir posibles causas de fallo de las máquinas. Con el desarrollo de estos equipos se conseguirá una normalización para el procedimiento de ensayo de envejecimiento de materiales, tema muy importante y que aún no está definido, y nuevos métodos o mejora de los actuales para proporcionarnos un indicador contrastado del grado de deterioro de un sistema de aislamiento.

La medida de la resistencia de materiales al ataque por DP parece ser uno de los métodos que con desarrollo por parte de las empresas de diseño de aislamientos y bobinados de Alta Tensión, serviría para clasificar los materiales utilizados en máquinas de AT en distintos niveles y características a partir de los requisitos necesarios.

6.- Bibliografía.

[J. Díaz-Gautier, 2002] “Caracterización de Defectos en Sistemas de Aislamiento Mediante Detección de Descargas Parciales”; J. R. Díaz Gautier; Proyecto fin de Carrera Universidad Carlos III de Madrid; 2002.

[Docavo, 2008] “Separación de Fuentes de Descargas Parciales en Sistemas de Aislamiento Mediante el Equipo PD Base”; I. Docavo Múñiz; Proyecto fin de Carrera Universidad Carlos III de Madrid; 2008.

[Stone, 2004] “Electrical insulation for rotating machines - design, evaluation, aging, testing, and repair”; IEEE Press, Greg C.Stone., Edward a. Boulter., Ian Culbert., Hussein Dhirani; 2004.

[Khalifa, 1990] “High Voltage Engineering (Theory and Practice)”; Khalifa M; 1990.

[PDCheck Manual, 2008] “PDCheck Operator’s Manual”; Techimp Systems S.r.l.. Disponible en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión de la Universidad Carlos III de Madrid; 2008.

[Adwel, 2006] “Descargas Parciales y aislamiento estatórico”; Seminario de UNITRONICS S. A.; 2006.

[Lyles, 1988] IEEE Transactions on Energy Conversion Vol. 3, No. 4, “Experience with PDA Diagnostic. Testing on Hydraulic Generators”; J. F. Lyles, G. C. Stone, and M. Kurtz; 1988.

[IEC 60034-27, 2006] “Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines”; IEC TS 60034-27. Rotating Electrical Machines Part 27, 2006.

[Cavallini, 2003] “A New Approach to the Diagnosis of Solid Insulation Systems Based on PD Signal Inference”; IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol 19; A. Cavallini, G.C. Montanari, A. Contin y F. Puletti; 2003.

[Stone, 1993] “The Statistics of Aging Models and Practical Reality”; IEEE Transactions on Electrical Insulations. Vol 28; G. C. Stone; 1993.

6.1.- Normativa relacionada.

“PDMonitor Manual”; Techimp Systems S.r.l.. Disponible en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión de la Universidad Carlos III de Madrid ; 2005.

“PDBase Operator’s Manual”; Techimp Systems S.r.l.. Disponible en el Laboratorio de Investigación y Ensayos en Alta Tensión de la Universidad Carlos III de Madrid ; 2005.

“Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines”; IEEE Std. 522. IEEE Power Engineering Society; 1992.

“PD Inference for Early Detection of Electrical Treeing in Insulation Systems”; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation; Cavallini A., Conti M., Montanari G.C., Arlotti C., Contin A; 2003.

“Study of Slot Partial Discharges in Air-cooled Generators”; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 15, No. 6; Claude Hudon, Mario Bélec, Mélanie Lévesque.

“Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus-Electrical Machinery”; IEEE Std 62.2. Ensayos de campo; 2004.

“IEEE Trial Use Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery”; IEEE Std 1434. Descripción de ensayos y técnicas utilizables; 2000.

“Standard Test Method for Detections and Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems”; ASTM D; 1868-81.

“Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements”; IEC 60270-12-; 2000.

“Recommended Practice for Voltage Endurance Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Generators”; IEEE 1043; 2000.

“Recommended Practice for Temperature Limits in the Rating of Electrical Equipment and for the Evaluation of Electrical Insulations”; IEEE Standard No. 1.

“Principales aspectos de la evaluación funcional de los sistemas de aislamiento eléctrico: Envejecimiento de los mecanismos y procedimientos diagnósticos”; IEC 60610.

“Guía para la Elaboración de procedimientos de ensayo para evaluar la resistencia térmica de los sistemas de aislamiento eléctrico”; IEC 60611.

“Detailed voltage endurance test procedure for form-wound bars or coils”; IEEE 1043.

